



Marta Isabel Vieira dos Reis

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

**Caracterização da resistência dinâmica
na soldadura por resistência por pontos
de varões de aço A500EL**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Carla Maria Moreira Machado, Professora Auxiliar,
FCT-UNL

Co-Orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Professor
Catedrático, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Rosa Maria Mendes Miranda, Professora
Associada com Agregação, FCT-UNL

Arguente: Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor
Auxiliar, FCT-UNL

Vogal: Professora Doutora Carla Maria Moreira Machado, Professora
Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio 2015

**Caracterização da resistência dinâmica na soldadura por resistência por pontos de varões
de aço A500EL**

Copyright © 2015 por Marta Isabel Vieira dos Reis

Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus Pais, Irmã e Tia

Agradecimentos

Foram várias as pessoas que me ajudaram e acompanharam para que este trabalho fosse concluído. Deste modo quero agradecer:

À minha orientadora, Professora Doutora Carla Machado pela oportunidade de realizar este trabalho. O seu empenho, motivação e apoio prestados foram exímios.

Ao meu co-orientador Professor Doutor Pamies Teixeira pela ajuda prestada.

À empresa Codimetal, em especial ao Engenheiro Duarte e ao Hélder por toda a ajuda e disponibilidade.

Aos técnicos das oficinas do DEMI, Sr. Paulo e Sr. Campos que foram sempre prestáveis.

Ao departamento de Eletrotécnica pelo empréstimo do osciloscópio.

Aos meus amigos e colegas que conheci ao longo do curso de Engenharia Mecânica na FCT.

Ao Diogo, por teres estado sempre ao meu lado e me teres apoiado ao longo desta etapa, sempre com paciência e amor.

O meu maior agradecimento vai para a minha família, em especial aos meus pais, Luz e Rui, à minha irmã Filipa e à minha tia Palmira, que é a minha segunda mãe. Obrigada por todo o amor, carinho, motivação e apoio nos momentos mais difíceis.

Resumo

A soldadura por resistência por pontos (SRP) é um processo que está implementado num campo diversificado de indústrias e envolve uma vasta gama de materiais, sendo um dos processos mais usados na ligação de chapas de metais. Existe uma vasta bibliografia deste processo relativamente à sua aplicação em chapas, contudo é praticamente inexistente em relação à aplicação em varões. A indústria de redes eletrossoldadas é uma das áreas onde este processo de soldadura é empregue em varões. A SRP é um processo extremamente rápido e a sua monitorização é muito importante para estimar a qualidade da soldadura. A monitorização da resistência dinâmica é uma das formas mais fidedignas de monitorizar o processo.

A parte experimental deste trabalho foi conduzida em ambiente industrial, na *Codimetal Industries, SA*. Neste estudo foram soldados varões de aço A500 EL com diâmetros de 6 mm e 8 mm onde se variou a intensidade da corrente e força de aperto por forma a analisar a variação da resistência dinâmica em função da força de aperto no processo de soldadura por resistência por pontos na produção de redes eletrossoldadas.

Os resultados deste trabalho constituem um contributo para a consolidação do conhecimento nesta área específica, pela verificação e quantificação da importância da relação entre a resistência dinâmica e a força de aperto. Com efeito, a resistência dinâmica tende a diminuir com o aumento da força de aperto e da intensidade de corrente. Verificou-se ainda que a área deformada tende a aumentar com o aumento do número de ciclos de soldadura, com a intensidade da corrente e com a força de aperto, e que maiores deformações nos varões conduzem a menores resistências dinâmicas. O diâmetro dos varões é também um factor determinante na análise da influência dos parâmetros de soldadura por resistência por pontos na qualidade da soldadura. Finalmente concluiu-se que o comportamento das curvas de resistência dinâmica é diferente na soldadura de varões quando comparado com as das chapas.

Palavras-chave:

Soldadura por resistência por pontos

Resistência dinâmica

Varões eletrossoldados

Força de aperto

Abstract

The resistance spot welding (RSW) is a process that is widely implemented in diverse industries and involves a wide range of materials, being one of the most used joining processes in sheet metal. There is a vast bibliography on this process when applied in sheet metal. However, it is practically non-existent for the application in rods. The electro welded net industry is the main area where this process is employed in welding rods. The RSW is an extremely fast process and its monitoring is very important to estimate the quality of welding. Monitoring of dynamic resistance is one of the most reliable ways of monitoring the process.

The experimental part of this work was conducted in an industrial environment, in *Codimetal Industries, SA*. In this study A500 EL steel rods with 6 mm and 8 mm diameter were welded with variation of the current intensity and tightening force in order to analyse the variation of the dynamic resistance as a function of the clamping force in the resistance spot welding process for electro welded nets production.

The results obtained constitute a contribution to the consolidation of knowledge in this specific area, by verifying and quantifying the importance of the relationship between the dynamic resistance and tightening force. Indeed, the dynamic resistance tends to decrease with increasing clamping force and current intensity. It was also found that the deformed area tends to increase with the increase in the number of welding cycles, with the current intensity and the tightening force, and that higher deformations lead to smaller dynamic resistance. The diameter of the rods is also a determining factor in analysing the influence of resistance spot welding parameters in the welding quality. Finally it was concluded that the behaviour of the dynamic resistance curves is different when welding rods when compared with sheet metal.

Keywords:

Resistance spot welding

Electrical dynamic resistance

Electro welded rods

Tightening force

Índice de Matérias

1. Introdução	1
1.1 Motivação e Objetivos	1
1.2 Estrutura da Tese	2
2. Revisão do Estado da Arte	5
2.1 Breve Introdução Histórica	5
2.1.1 Introdução	6
2.2 Soldadura por Resistência	7
2.3 Soldadura por Resistência por Pontos	10
2.3.1 Intensidade	12
2.3.2 Resistência	13
2.3.3 Tempo de passagem de corrente	19
2.3.4 Força de Aperto	19
2.3.5 Eletrodos	20
2.3.6 Superfícies	23
2.3.7 Materiais a soldar	24
2.3.8 Equipamentos	26
2.4 Redes electrossoldadas	27
3. Procedimento Experimental	31
3.1 Introdução	31
3.2 Material a soldar	32
3.2.1 Caracterização físico química do material	32
3.3 Equipamento Experimental	33
3.3.1 Equipamento de Soldadura	33
3.3.2 Equipamento de controlo e aquisição de dados	36
3.3.3 Tratamento de dados	43
3.4 Montagem experimental	43
3.5 Plano Experimental	45

4. Discussão de Resultados.....	47
4.1 Introdução	47
4.2 Ensaio preliminares	47
4.3 Resultados experimentais.....	49
4.4 Resistência dinâmica	50
4.5 Força de aperto	58
4.6 Área deformada	60
4.7 Caracterização estrutural	63
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	69
5.1 Conclusões e contribuição.....	69
5.2 Sugestão para trabalhos futuros.....	70
Referências Bibliográficas.....	71
 Anexo A1. Tabelas dos resultados de Rd.....	 73
Anexo A2. Gráficos da força de aperto.....	77

Índice de Figuras

Figura 1.1- Estrutura da dissertação por capítulos	3
Figura 2.1- Máquinas de soldadura por resistência.....	6
Figura 2.2 – Representação do processo de soldadura resistência por pontos	8
Figura 2.3 - Tipos de soldadura por resistência em juntas sobrepostas.....	10
Figura 2.4 – Ciclo de soldadura SRP	11
Figura 2.5 – a) Região de operação do processo de soldadura; b) Soldadura insuficiente; c) Expulsão.....	13
Figura 2.6 - Relação entre resistência e temperatura.....	14
Figura 2.7 – Curva tórica da resistência dinâmica	15
Figura 2.8 – Resistências de contacto nas superfícies.....	16
Figura 2.9 – Curvas de resistência dinâmica para diferentes tipos de material.....	17
Figura 2.10 – Efeito da força de aperto na resistência dinâmica em material carbono AK.....	20
Figura 2.11 – Efeito da força de aperto na resistência das superfícies.....	20
Figura 2.12 – Curva do deslocamento do eletrodo.....	21
Figura 2.13 –Tipos de pontas de eletrodos.....	22
Figura 2.14 – Refrigeração de um eletrodo.....	22
Figura 2.15 – Área de contacto do eletrodo em função do desgaste	23
Figura 2.16 – Superfícies de eletrodos desgastadas	23
Figura 2.17 – a) Diagrama de fases Fe-C ; b) Transformações durante o arrefecimento lento de um aço hipoeutectóide.....	25
Figura 2.18 – Estrutura esquemática de uma solidificação ideal	26
Figura 2.19 - Equipamento de soldadura por resistência por pontos	27
Figura 2.20 - a) Corte de varão eletrossoldados; b) Rede eletrossoldadas; c) Execução de pontos de soldadura	28
Figura 2.21 – Exemplos de utilização de redes eletrossoldadas.....	29

Figura 2.22 – Armazenamento de redes eletrosoldadas	30
Figura 3.1 – Protótipo de SRP	34
Figura 3.2 – Armário de comando.....	35
Figura 3.3 – Dimensões dos eletrodos.....	35
Figura 3.4 – Controlador da soldadura	36
Figura 3.5 - Modulação da corrente através do hardware de controlo	37
Figura 3.6 – Menu principal do programa BOS 5000	38
Figura 3.7 – Menu de programação do programa BOS 5000.....	38
Figura 3.8 – Interface do programa BOS 5000	39
Figura 3.9 - Programa de aquisição de dados e controlo de soldadura	40
Figura 3.10 –Osciloscópio Tektronix TDS 3054B.....	41
Figura 3.11 – Ligação aos eletrodos para medição da tensão	41
Figura 3.12 – Bobina Rogowski.....	42
Figura 3.13 – Montagem da célula de carga.....	43
Figura 3.14 – Esquema da montagem experimental	44
Figura 4.1 – Influência do número de ciclos e intensidade de corrente sobre a área deformada	48
Figura 4.2 – Corrente e tensão (d = 8 mm; P = 60 bar; %I = 40%).....	49
Figura 4.3 – Resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 35 bar	50
Figura 4.4 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 40 bar	50
Figura 4.5 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 45 bar	51
Figura 4.6 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 50 bar	51
Figura 4.7 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 55 bar	52
Figura 4.8 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 60 bar	52
Figura 4.9 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d= 8 mm e P = 65 bar	53
Figura 4.10 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 70 bar	53
Figura 4.11 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 75 bar	54
Figura 4.12 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 80 bar	54

Figura 4.13 – Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica (d = 6 mm).....	56
Figura 4.14 – Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica (d = 6 mm) com omissão do ensaio referente a %I = 20% e P = 35 bar	56
Figura 4.15 - Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica (d = 8 mm)	57
Figura 4.16 – Representação bidimensional para varão de d = 6 mm.....	57
Figura 4.17 – Representação bidimensional para varão de d = 8 mm.....	58
Figura 4.18 - Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 6 mm e P = 35 bar	59
Figura 4.19 - Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 6 mm e P = 55 bar	59
Figura 4.20- Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 8 mm e P = 60 bar	60
Figura 4.21- Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 8 mm e P = 80 bar	60
Figura 4.22 – Área deformada para varão de 6 mm de diâmetro	62
Figura 4.23 - Área deformada para varão de 8 mm de diâmetro.....	62
Figura 4.24 – Área deformada para varão de 6 mm de diâmetro	63
Figura 4.25 – Área deformada para varão de 8 mm de diâmetro	63
Figura 4.26 – Fotomacrografia (Ensaio 6_35_20)	64
Figura 4.27 – Fotomacrografia: a) ensaio 6_55_60 b) ensaio 8_60_40 c) ensaio 8_80_80.....	65
Figura 4.28 – Fotomicrografia do material de base.....	66
Figura 4.29 – Fotomicrografia da zona de transição do material de base para a ZTA.....	66
Figura 4.30 - Fotomicrografia da ZTA.....	66
Figura 4.31 – Fotomicrografia da zona de transição entre a ZTA e ZF	66
Figura 4.32 – Fotomicrografia da zona fundida.....	66
Figura 4.33 – Localização da análise do refinamento de grão	67
Figura 4.34 – Análise de microdureza	68

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação dos processos de soldadura elétrica por resistência.....	8
Tabela 3.1 – Valores nominais e tolerâncias	32
Tabela 3.2 – Composição química dos fios laminados	33
Tabela 3.3 – Plano de ensaios	45
Tabela 4.1 – Ensaios preliminares.....	48
Tabela 4.2 - Valores obtidos para $d = 8 \text{ mm}$ e $P = 60 \text{ bar}$	49
Tabela 4.3 – Valores experimentais para F , R_d e A	61
Tabela 4.4 – Ensaios considerados para caracterização da zona soldada.....	64

Nomenclatura

<i>CA</i>	Corrente alterna
<i>EL</i>	Varões com superfícies lisas endurecidos a frio
<i>ER</i>	Varões com superfícies corrugados e endurecidos a frio
<i>F</i>	Força de Aperto
<i>I</i>	Corrente
<i>NI</i>	National Instruments
<i>NR</i>	Varão de dureza natural
<i>Q</i>	Calor
<i>R</i>	Resistência
<i>Rd</i>	Resistência dinâmica
<i>RMS</i>	Raiz quadrada da média da soma dos quadrados (Root mean square)
<i>RSW</i>	Resistance Spot Welding
<i>SD</i>	Varão de ductilidade especial
<i>SRP</i>	Soldadura por resistência por pontos
<i>t</i>	Tempo
<i>ZF</i>	Zona de fusão
<i>ZTA</i>	Zona termicamente afetada
α	Ferrite α
δ	Ferrite δ
γ	Austenite

Introdução

A soldadura por resistência por pontos é um processo que está bem implementado num campo diversificado de indústrias e envolve uma vasta gama de materiais, sendo um dos processos mais usados na ligação de chapas de metais. A SRP é uma das técnicas de ligação mais usadas na indústria de transportes. Um automóvel convencional pode ter entre 3000 a 6000 pontos de soldadura deste processo para unir chapas. Uma outra grande área de aplicação deste processo é na fabricação de redes eletrossoldadas utilizadas na construção civil. Estas redes são constituídas por varões de aço dispostos paralelamente em duas direções ortogonais, sendo os pontos de contacto entre varões soldados por soldadura por resistência por pontos.

A monitorização correta do processo permite obter informações da sua evolução e corrigir problemas, evitando a propagação destes ao longo das soldaduras. Conhecendo bem os mecanismos do processo é possível melhorar o seu desempenho durante a fabricação deste tipo de estrutura. Neste sentido, a investigação dos parâmetros do processo e das suas relações é fundamental.

1.1 Motivação e Objetivos

A soldadura por resistência por pontos (SRP), sendo um dos tipos de soldadura mais utilizado em termos industriais, tem sido alvo de investigação no que concerne aos mecanismos que regem o processo e à influência das variáveis processuais sobre a qualidade da soldadura. A monitorização correta do processo permite obter informações da sua evolução e corrigir problemas, evitando a propagação destes ao longo das soldaduras.

A principal motivação que conduziu à realização deste trabalho aborda as reais dificuldades sentidas na produção de redes eletrossoldadas. Neste caso, é necessário o correto controlo dos parâmetros processuais para que o produto final cumpra os requisitos de qualidade

necessários e especificados. Essas questões não incluem apenas a influência das variáveis de processo, mas também fatores como o tempo de produção e alocação de recursos.

Além disso, a investigação científica realizada nesta área incide especialmente na aplicação deste processo de soldadura em chapa. Quando se trata de soldadura por resistência por pontos aplicada a varões não existe muita informação científica sobre o assunto.

A parte experimental deste trabalho foi conduzida em ambiente industrial, nomeadamente na *Codimetal Industries, SA*. Os varões utilizados, de aço do tipo A500EL, foram selecionados por serem os utilizados por esta empresa na sua produção. Estes varões não são corrugados para ser possível avaliar efetivamente o processo e para ser possível adquirir mais informação acerca deste processo neste tipo de material, com esta geometria de secção circular.

Desta forma, um dos âmbitos deste estudo é a caracterização do processo de resistência por soldadura por pontos pela análise da curva de resistência dinâmica variando os parâmetros do processo. Pretende-se assim cumprir o objectivo principal deste trabalho que é a investigação da influência da força de aperto sobre a resistência dinâmica no processo de soldadura por resistência por pontos na produção de redes eletrossoldadas.

1.2 Estrutura da Tese

A dissertação está dividida em quatro partes: **Introdução, Estado da Arte, Trabalho Experimental e Conclusões**. Na Figura 1.1 estão representadas as quatro partes.

Introdução – Nesta primeira parte do trabalho é feita uma breve introdução ao tema em estudo. São apresentadas as motivações e os principais objetivos a atingir na conclusão deste estudo.

Estado da Arte – Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos para uma melhor compreensão do tema. É feita uma revisão bibliográfica para saber qual o estado atual e os estudos efetuados em relação a este tema. Está dividido em 4 partes. Na primeira parte é apresentada uma breve história da soldadura. Na segunda parte faz-se uma abordagem à soldadura por resistência. Na terceira parte descreve-se a soldadura por resistência dos pontos e são explicados os vários parâmetros deste processo. Na última parte é abordado o tema das redes eletrossoldadas, onde são dados exemplos de aplicação e são mencionadas as suas características.

Trabalho experimental – Os capítulos 3 e 4 são compostos pela parte experimental do trabalho. No capítulo 3 são definidas todos os procedimentos experimentais. No capítulo 4 os resultados experimentais são apresentados e discutidos.

Conclusões – No último capítulo são apresentadas as conclusões, as contribuições efetuadas com este trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

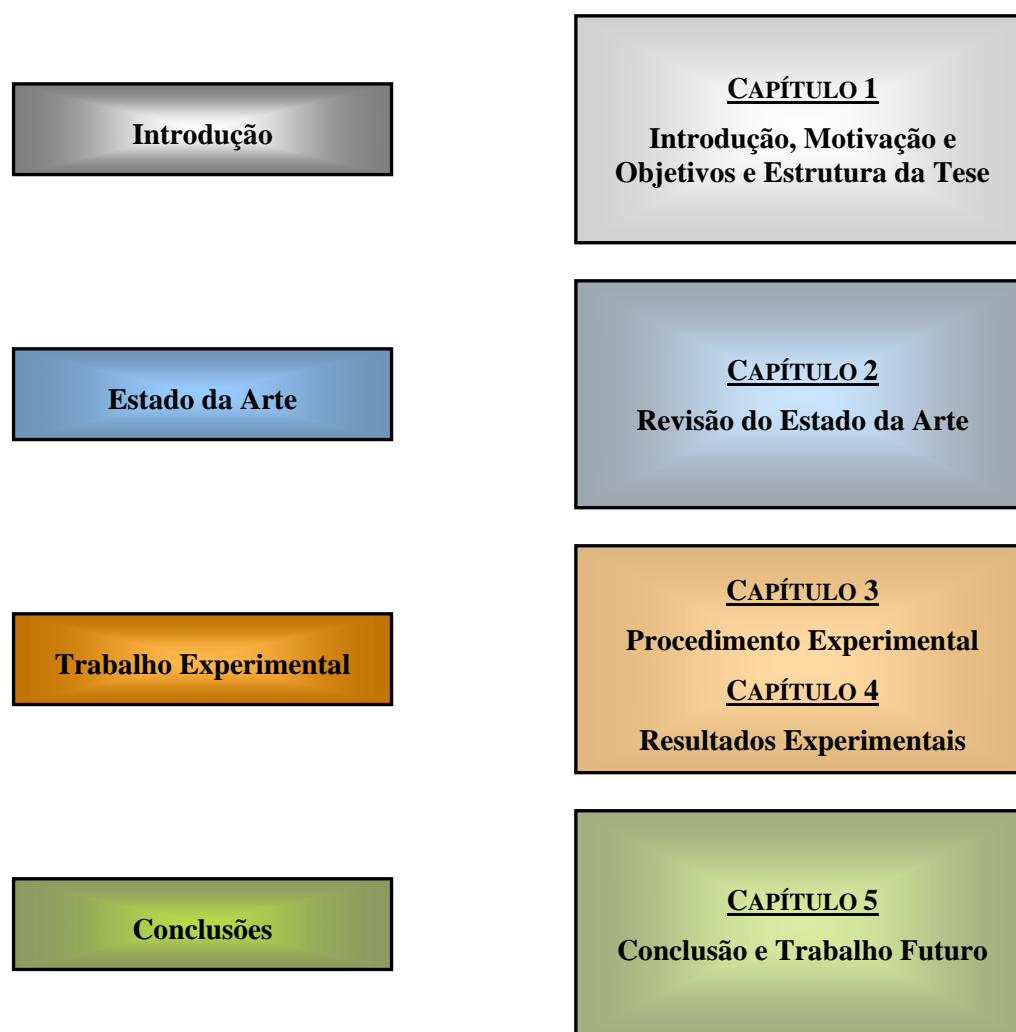


Figura 1.1- Estrutura da dissertação por capítulos

Revisão do Estado da Arte

2.1 Breve Introdução Histórica

O forjamento e a brasagem foram os primeiros tipos de soldadura a aparecer, sendo usadas para o fabrico de peças cortantes, como punais e espadas. No Museu do Louvre está em exposição um pingente em ouro que data de 4000 a.c. da zona da Pérsia com indicações de ter sido soldado [1].

Até à Idade Média a soldadura foi um processo muito importante na tecnologia metalúrgica, porém essa situação mudou durante os séculos XII e XIII devido ao aparecimento das rodas de água que permitiam a obtenção de grandes quantidades de ferro fundido no estado líquido e com o desenvolvimento do alto-forno nos séculos XIV e XV [1].

A soldadura permaneceu como um processo de fabricação secundário até ao século XIX, altura em que o Sir Humphry Davy descobriu o arco elétrico em 1802. A descoberta do acetileno por Edmund Davy em 1836 e o desenvolvimento de fontes produtoras de energia elétrica permitiram o aparecimento de processos de soldadura por fusão [1].

A primeira patente relativa a um processo de soldadura surgiu em Inglaterra em 1885, obtida por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky. Tratava-se do processo de arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada [1,2].

A soldadura por resistência desenvolveu-se nos finais do século XIX. Em 1857 o inglês James Prescott Joule descreveu a possibilidade de soldar metais através do aquecimento por resistência, tendo o americano Elihu Thomson em 1886 descoberto a soldadura por resistência [3]. O russo Nicolai Benardos em 1887/1888 inventou a soldadura por resistência por ponto de chapas de ferro com eletrodos de carbono. Em 1897 Kleinschmidt substituiu os eletrodos de carbono por eletrodos de cobre, tendo esta substituição sido fundamental para o desenvolvimento e aplicação da soldadura por resistência [2].

A soldadura por pontos surgiu em 1988 com aplicação em utensílios de cozinha [4].

A primeira máquina de soldadura por resistência topo a topo apareceu em 1903, tendo surgido três anos mais tarde, em 1906, a primeira máquina de soldadura por resistência por pontos [2]. Na Figura 2.1 pode-se observar as máquinas mencionadas anteriormente.

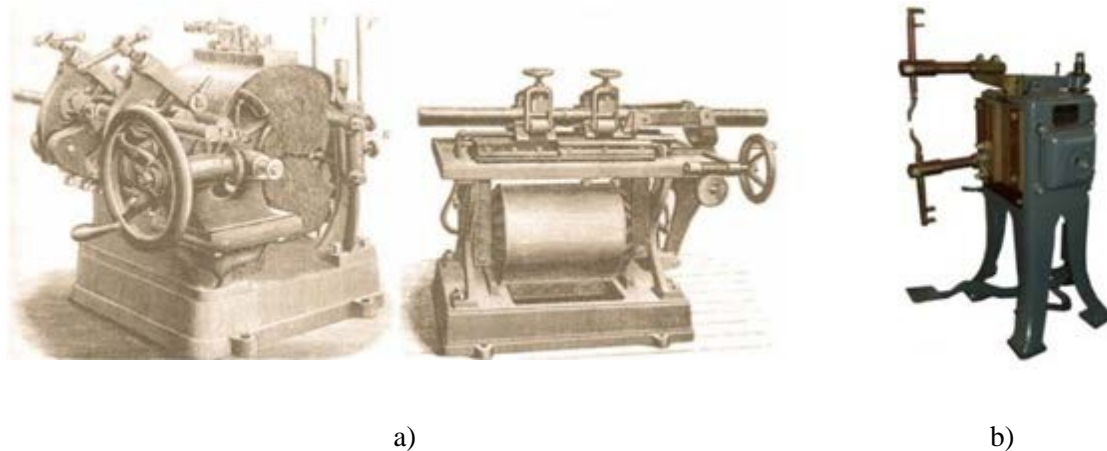


Figura 2.1- Máquinas de soldadura por resistência [2]: a) Máquina de soldadura por resistência topo a topo b) Máquina de soldadura por resistência por pontos

Em 1915 a SRP foi implementada na indústria automóvel, levando ao desenvolvimento de novos processos. A soldadura teve um grande desenvolvimento na 1ª Grande Guerra Mundial devido à produção material bélico [5].

Atualmente existem mais de 50 tipos de soldadura, sendo o processo mais utilizado na ligação permanente de metais.

2.1.1 Introdução

O processo de soldadura consiste na união permanente de duas peças, podendo esta união ser feita através de calor, pressão ou ambos, com ou sem adição de material. É o processo mais utilizado na ligação de metais e um dos mais importantes usados industrialmente, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e com economia de material. Apesar destas vantagens, a soldadura também tem limitações, não podendo ser aplicada a peças em que seja necessária a sua desmontagem devido à sua união permanente e a existência de efeitos produzidos pela aplicação térmica e/ou mecânica. Esses defeitos podem ser sob forma de distorções, tensões residuais ou metalúrgicas, como a alteração de propriedades das peças [1].

Os vários tipos de soldadura existentes podem ser divididos em dois grupos: soldadura por fusão e soldadura no estado sólido. A soldadura por fusão liga as peças a soldar através da utilização do calor para fundir o metal. O metal pode provir das peças a soldar caso sejam de pequena espessura ou pode incluir material proveniente de um fio-eletrodo caso as chapas sejam

espessas [3]. Na soldadura no estado sólido estão incluídos os processos que usam pressão para que os dois lados da junta estejam em contacto a nível atómico, sendo isso conseguido através de deformação, difusão atómica ou combinação dos dois [3].

A soldadura por resistência por pontos está classificada na literatura como sendo um processo de soldadura no estado sólido, embora exista a formação de um núcleo de fusão.

2.2 Soldadura por Resistência

A soldadura por resistência permite a união de duas ou mais peças de metal através da geração de calor produzida pela resistência das peças à passagem de uma corrente elétrica. Este processo não utiliza material de adição, necessitando apenas de pressão e calor [6].

A primeira lei de Ohm estabelece que a razão entre a diferença de potencial, U (V), e a corrente elétrica, I (A), num condutor é igual à resistência elétrica, R (Ω), desse condutor (Eq. 2.1)

$$U = I \cdot R \quad \text{Eq. 2.1}$$

A potência elétrica dissipada, P (em W), por um condutor é definida como a quantidade de energia térmica, E (em J) que passa por ele durante uma quantidade de tempo, t (em s) (Eq. 2.2).

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \rightarrow Q = P \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 2.2}$$

Num sistema em que a tensão e a corrente se mantenham constantes, a potência transmitida é constante e é igual ao produto da intensidade da corrente pela tensão (Eq. 2.3).

$$P = I \cdot U \quad \text{Eq. 2.3}$$

Substituindo a equação Eq. 2.1 na equação Eq. 2.3 obtém-se a Eq. 2.4.

$$P = I^2 \cdot R \quad \text{Eq. 2.4}$$

Substituindo a Eq. 2.4 na Eq. 2.2 obtém-se a Eq. 2.5.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad \text{Eq. 2.5}$$

Esta última equação é conhecida pela lei de Joule e indica que a energia elétrica dissipada, Q , num dado intervalo de tempo Δt , é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade de corrente elétrica que o percorre. O princípio de funcionamento da soldadura por resistência baseia-se no efeito de Joule (Eq. 2.5). As peças a soldar são submetidas à passagem de uma corrente elétrica que gera calor pela resistência encontrada à sua passagem (Figura 2.2).

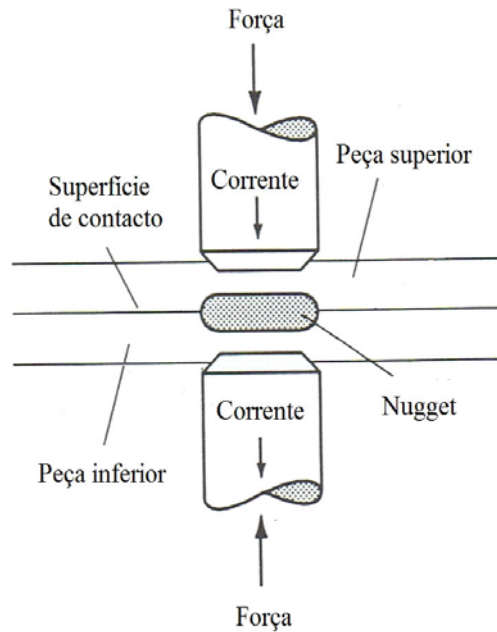


Figura 2.2 – Representação do processo de soldadura resistência por pontos (Adaptado de [6])

A soldadura por resistência é um processo muito usado no meio industrial por ser um processo rápido, facilmente automatizável, sem necessidade de consumíveis, com baixo custo de produção e sobretudo não necessita de mão de obra qualificada para trabalhar. A indústria automóvel, eletrónica, desportiva, médica, nuclear e civil são alguns exemplos das áreas onde a soldadura por resistência é aplicada. Apesar das vantagens ditas anteriormente, há que ter presente que o investimento inicial da máquina é elevado e que a manutenção necessita de elevado nível de especialização. A espessura das peças a soldar é limitada, dependendo do material a soldar, e em alguns materiais, como o alumínio, cobre, níquel, titânio ou magnésio é necessário uma preparação especial das superfícies a soldar. Este tipo de soldadura também requer muita energia elétrica durante o processo [4].

Existem vários processos na soldadura por resistência, estando estes representados na tabela seguinte (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Classificação dos processos de soldadura elétrica por resistência [3]

Tipo de junta	Tipo de Soldadura	Processo Mecânico	Forma de Aquecimento
Junta Sobreposta	Por Pontos	Com um par de eletrodos	Por Resistência (Efeito de Joule)
		Com um par de eletrodos de pontas múltiplas	
		Por pontas duplas	
		Pontas múltiplas executadas por um equipamento	
		Por roletes	
	Contínua	Com um rolete	
		Com um rolete e um suporte	
	Por Bossas (projection welding)	Prensa de soldadura	
Junta Topo a Topo	Por Resistência	Equipamento de Soldadura Topo a Topo	Por Resistência
			Por Faíscamento
	Por Faíscamento		Misto por Resistência e Faíscamento
Junta em T		Máquina de Soldadura por Pontos	Por Resistência
		Máquina de soldadura Topo a Topo	Por Faíscamento

Na soldadura de juntas sobrepostas existe a soldadura por pontos, contínua ou por bossas [3].

- soldadura por pontos as peças são soldadas entre si apenas através de porções limitadas das suas respectivas superfícies, ou seja, por pontos de soldadura
- soldadura contínua é realizada com eletrodos (roletes) que se deslocam relativamente às peças a soldar, formando uma linha de pontos de soldadura

- soldadura por bossas uma das peças possui umas pequenas saliências (bossas), as quais permitem realizar usando apenas um par de eletrodos um número de pontos de soldadura igual ao número de bossas existentes

Na figura seguinte (Figura 2.3) estão representados os três tipos soldadura de juntas sobrepostas.

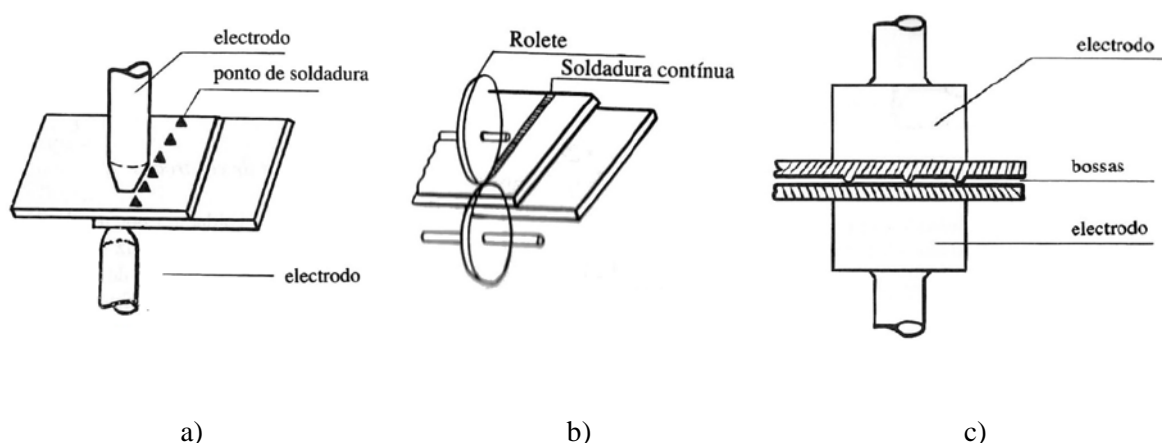


Figura 2.3 - Tipos de soldadura por resistência em juntas sobrepostas [3]: a) Soldadura por pontos b) Soldadura contínua c) Soldadura por bossas

2.3 Soldadura por Resistência por Pontos

A soldadura por resistência por pontos é um dos tipos de soldadura mais utilizada industrialmente devido à sua facilidade de automatização. O seu nome deve-se ao facto das peças serem soldadas entre si através de porções limitadas das suas superfícies, conforme se pode observar na Figura 2.3 a) [3].

Apesar do funcionamento ser aparentemente fácil, envolve um certo nível de complexidade devido à existência de inter-relações de problemas mecânicos, elétricos, térmicos e metalúrgicos [7].

Este tipo de soldadura é muito usado para juntar materiais em aço, mas pode ser também usado em materiais como o alumínio, cobre ou níquel [8].

A utilização deste processo de soldadura é variada, sendo muito utilizado na indústria automóvel, fabricação de móveis e armários, redes eletrossoldadas entre outros.

Os materiais a soldar devem permitir que as juntas sejam sobrepostas e que não seja necessária estanquidade.

O ciclo de soldadura divide-se em quatro fases: aplicação da força, soldadura, espera e remoção da força, conforme ilustrado na Figura 2.4.

Na fase da aplicação da força, as duas peças a soldar são sobrepostas e posteriormente são submetidas a uma pressão efetuada pelos eletrodos. Posteriormente quando a pressão está estabilizada, começa a fase de soldadura. As peças são submetidas a uma corrente elétrica de baixa tensão, alta intensidade e pequeno pulso de tempo, vinda dos eletrodos que gera calor através da resistência encontrada à sua passagem. A maior geração de calor será na interface das duas peças, onde a resistência é maior. Esse calor provoca uma fundição no material, dando origem a um *nugget*. Na fase de espera, a passagem da corrente proveniente dos eletrodos é extinta mas a força exercida pelos eletrodos mantém-se enquanto o *nugget* entre as peças arrefece e solidifica. Por fim, na fase de remoção da força os eletrodos cessam o contacto com as peças deixando de exercer pressão, terminando o ciclo de uma soldadura. Este processo é muito rápido durando frações de segundos [6], [9].

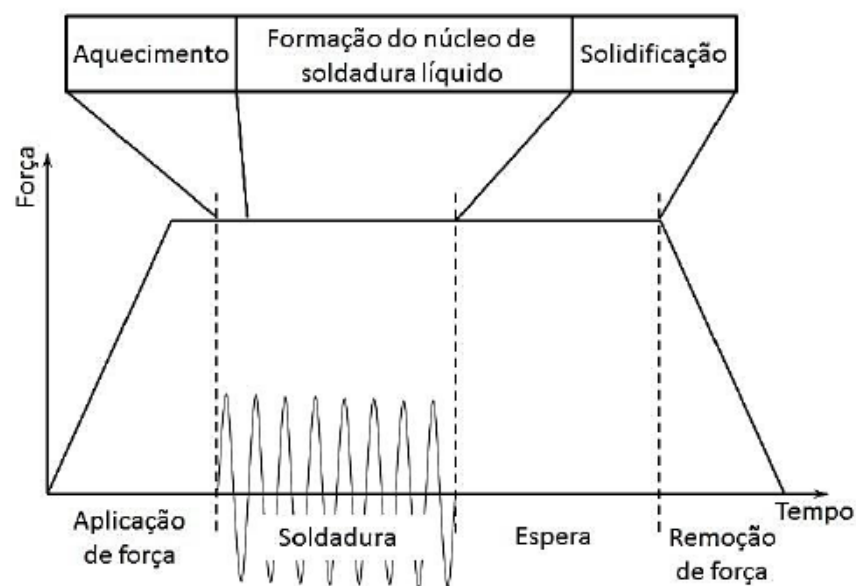


Figura 2.4 – Ciclo de soldadura SRP [5]

Para se obter uma soldadura com qualidade, os parâmetros de entrada têm que ser controlados, sendo esse um problema em estudo há muitos anos.

Os parâmetros importantes são a intensidade, resistência e tempo de corrente. Existem para além destes, outros parâmetros importantes como a pressão exercida por os eletrodos, os próprios eletrodos e a superfície das peças a soldar.

Devido à rapidez deste processo de soldadura não é possível visualizar a formação do *nugget*, sendo difícil o seu controlo.

Para inspecionar a qualidade da soldadura usam-se os ensaios destrutivos ou ensaios não destrutivos. Os ensaios destrutivos podem ser morosos, dispendiosos e normalmente inviabilizam as peças. Estes testes requerem experiência na sua preparação, nos testes e na análise dos dados. Os mais comuns são os ensaios de tração, de flexão, de torção e de fadiga.

Os ensaios não destrutivos são testes de controlo de qualidade realizados em peças acabadas sem inviabilizar a sua utilização. Emissão acústica, inspeção visual, correntes eddy e raio X são alguns END usados na inspeção da qualidade da soldadura por resistência por pontos. Contudo a maioria dos END são de difícil execução no local de fabricação, são dispendiosos e requerem mão de obra experiente, estando os resultados muitas vezes dependente deste último fator.

Uma forma de assegurar uma boa qualidade final é a monitorização ao longo do processo, permitindo uma boa robustez do processo e a identificação de falhas no momento de fabricação. Uma das formas mais fidedignas é a monitorização da resistência dinâmica devido à sua capacidade de dar informações acerca do crescimento e geometria do *nugget*. Este tema está melhor explicado mais adiante.

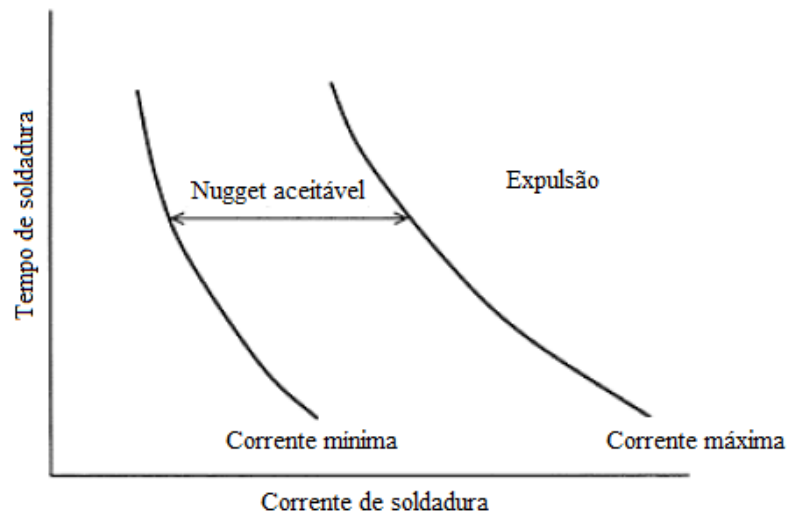
2.3.1 Intensidade

A corrente usada nos equipamentos pode ser corrente alterna ou corrente contínua.

Existe uma gama de valores da intensidade de corrente ideais para a realização da soldadura. Valores abaixo do limite inferior não produzem calor suficiente para que ocorra a fusão do material (Figura 2.5 - b) e valores acima do limite produzem um aquecimento de toda a espessura da peça entre os eletrodos, havendo deformação plástica em toda a secção abaixo dos eletrodos e levando a possíveis penetrações excessivas destes na superfície das peças ou até mesmo expulsão (Figura 2.5 - c). Uma elevada intensidade de corrente pode causar fendas na soldadura, diminuição das propriedades da resistência mecânica e produzir um elevado sobreaquecimentos dos eletrodos, diminuindo a sua vida útil.

A gama de valores da intensidade da corrente depende de fatores como a área de contacto entre os eletrodos e as superfícies das peças, material a ser soldado e as espessuras das peças [1], [9]. A resistência máxima da junta é obtida para valores de corrente ligeiramente inferior ao limite superior devido à formação de um *nugget* maior [1] [10]. A expulsão não implica necessariamente uma diminuição da resistência de soldadura porém causa um desgaste maior dos eletrodos, um

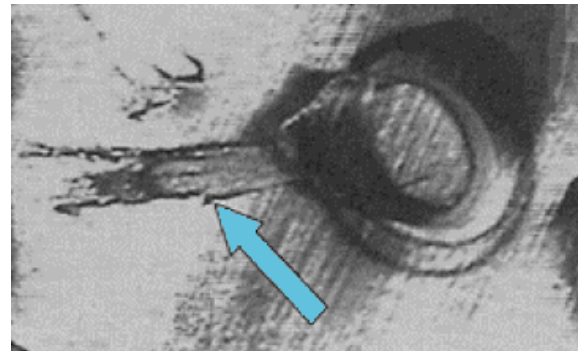
maior consumo de energia, uma aparência visual insatisfatória e uma baixa resistência à corrosão em materiais revestidos [10].



a)



b)



c)

Figura 2.5 – a) Região de operação do processo de soldadura [11] b) Soldadura insuficiente [12] c) Expulsão [12]

2.3.2 Resistência

Durante o processo de soldadura a corrente elétrica circula de um eletrodo para o outro, atravessando as peças a soldar. Neste percurso existem várias resistências que irão gerar calor, estando estas dependentes de fatores como a resistividade dos materiais, força de aperto, condições das superfícies dos materiais a soldar, materiais dos eletrodos e a sua geometria [3].

Na Figura 2.6 estão representadas as várias resistências, onde R1 e R7 representam as resistências internas dos eletrodos, R2 e R6 as resistências nas interfaces eletrodo-peça, R3 e R5 as resistências internas das peças e o R4 a resistência na interface das duas peças. O calor é necessário

apenas no ponto R4, por isso a resistência neste ponto deve ser alta e as outras resistências devem ser minimizadas o quanto possível.

A resistência total é o somatório das várias resistências mencionadas anteriormente (Eq. 2.6)

$$R_{\text{Total}} = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6 + R7 \quad \text{Eq. 2.6}$$

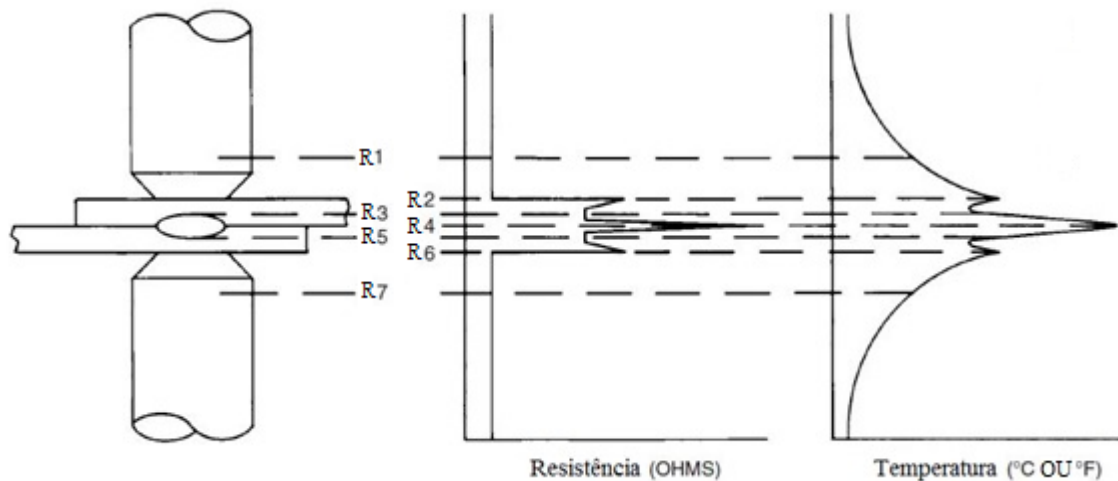


Figura 2.6 - Relação entre resistência e temperatura (adaptado de [9])

2.3.2.1 Resistência Dinâmica

Durante o processo de soldadura a resistência elétrica não se mantém constante, sendo função da temperatura e da força dos eletrodos. Segundo Wang e Wei [13], Roberts em 1951 descobriu experimentalmente que a resistência não se pode considerar constante, designando-se por resistência dinâmica.

Ao longo dos anos, têm sido vários os estudos dedicados ao tema da resistência dinâmica, concluindo que é uma boa forma de monitorizar o processo. A monitorização da resistência dinâmica permite obter informações sobre a formação e crescimento do *nugget* em tempo real e é muito fácil de executar, não necessitando de equipamentos complexos.

Nos primeiros estudos relativos ao cálculo da resistência dinâmica, o cálculo da resistência era efetuado através da divisão dos valores instantâneos da tensão pelos valores instantâneos da corrente [14].

Os primeiros sistemas de controlo de qualidade realimentados eram do tipo liga-desliga. A resistência dinâmica era monitorizada e o controlador parava a soldadura quando era atingido um

valor pré-definido. O problema da utilização deste método é a necessidade de determinar o valor da variável à qual a soldadura deve parar. A determinação dos valores era feita através de ensaios experimentais. Posteriormente vieram os sistemas de controlo da qualidade realimentados do tipo *tracking*. Neste caso o sistema ajusta a corrente por forma a seguir um sinal de referência. Este sistema produz melhores resultados do que o sistema liga-desliga, contudo continua a ser afetado por ruído [10].

Dickinson et al [14] projetaram um aparelho que registava os valores instantâneos de tensão, corrente, potência e resistência durante o processo. A resistência era obtida pela divisão dos valores instantâneos da tensão pelos valores instantâneos da corrente obtida nos picos. Explicaram também a variação da curva da resistência dinâmica relativamente às diferentes fases que ocorrem durante o processo.

Vários estudos, como o de Dickinson et al [14] e de Savage et al [15] tentaram explicar a forma da curva da resistência dinâmica. As formas obtidas foram semelhantes, apresentando o aspeto representado na Figura 2.7.

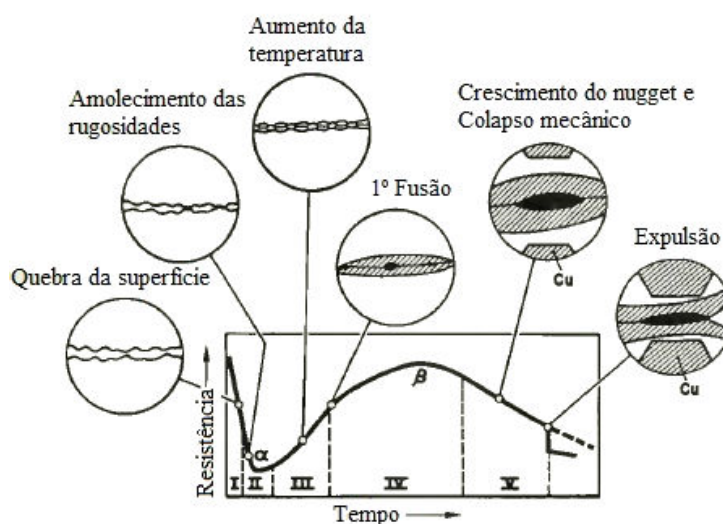


Figura 2.7 – Curva tórica da resistência dinâmica (Adaptado de [14])

A curva apresenta cinco etapas, que se descrevem em seguida:

No início da passagem de corrente, a resistência apresenta um valor elevado, decrescendo rapidamente. Tal situação pode ser justificada pela presença de rugosidades nas superfícies das peças que provocam uma menor área de contacto e da sujidade existente nas superfícies, conforme ilustrado na Figura 2.8. Com o tempo, a passagem da corrente produz um aumento de temperatura que amolece as rugosidades e aumenta a área de passagem de corrente, diminuindo a resistência. A presença de óxidos e de substâncias isoladoras nas superfícies vão diminuindo ao longo do tempo.

Na etapa II o declive da reta é menor. A área de contacto entre superfícies vai aumentando devido ao amolecimento da rugosidade, mas o aumento da temperatura também vai provocar um aumento da resistividade do material, o que provoca um aumento da resistência. O ponto mínimo é designado por ponto α .

Durante a etapa III a resistividade do material aumenta devido ao aumento da temperatura, causando um aumento da resistência. A etapa acaba quando se inicia a fusão da interface peça-peça, que representa o ponto de inflexão da curva.

Durante a etapa IV dá-se o crescimento do *nugget*. Esta etapa é influenciada por três mecanismos. O aumento da resistividade das peças continua devido ao aumento da temperatura. Por sua vez, há formação do *nugget*, facilitando a passagem da corrente e diminuindo a resistência. Existe um amolecimento das peças, que com a força dos eletrodos encurta a distância percorrida pela corrente, diminuindo a resistência. A curva atinge o seu máximo no ponto β , significando que foi atingido o ponto de estabilização da temperatura.

Por fim, na etapa V continua o crescimento do *nugget* e o colapso mecânico, diminuindo a resistência. Se o *nugget* tem um grande crescimento, o material sólido ao seu redor pode não aguentar a força dos eletrodos e pode haver expulsão. Esta situação é representada na curva por uma queda súbita da resistência.

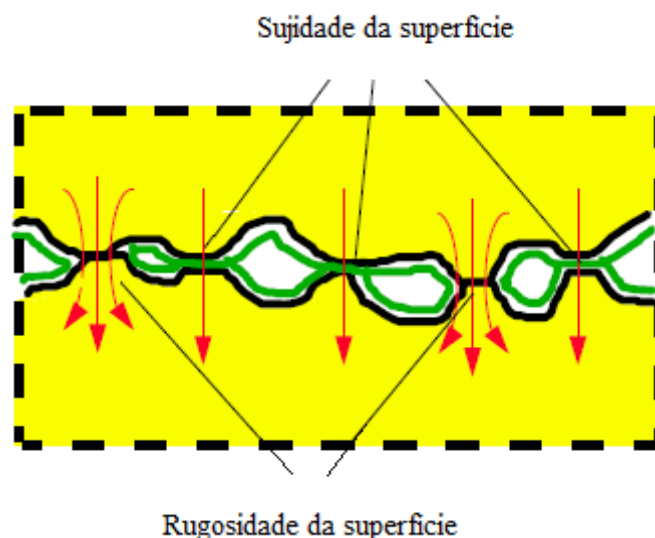


Figura 2.8 – Resistências de contacto nas superfícies (Adaptado de [16])

Segundo Ma et al [7], Andrews e Bhattacharya em 1975 efetuaram um estudo onde apresentaram a existência de várias formas da curva da resistência, dependendo do material que se está a soldar, conforme ilustrado na Figura 2.9.

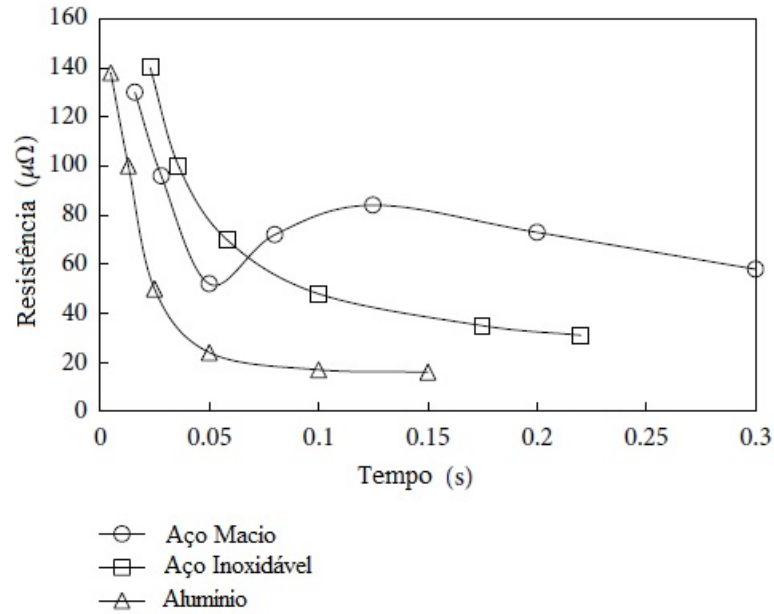


Figura 2.9 – Curvas de resistência dinâmica para diferentes tipos de material (Adaptado de [7])

Com este estudo foi possível concluir que apenas a curva de resistência dinâmica do aço macio apresenta uma correlação com o crescimento do *nugget* e uma estimativa para a monitorização da qualidade da soldadura, contrariamente às das curvas de resistência do aço inoxidável e do alumínio que não se consegue fazer nenhuma correlação.

Gedeon et al [17] melhoraram a precisão da leitura da resistência, através da medição da corrente e da tensão a cada meio ciclo, ao invés dos seus valores de pico. Consideraram que a tensão através da carga indutiva está relacionada com a corrente através da Eq. 2.7 ajustando os dados da tensão e corrente num meio ciclo assumindo R e L constantes. Afirmaram também que é difícil de obter a curva de resistência dinâmica devido à presença de ruído indutivo proveniente das altas intensidades que dificulta a medição dos baixos valores de tensão.

$$V = IR + L \frac{dl}{dt} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Cho e Rhee [18] propuseram obter a curva da resistência dinâmica entre os eletrodos através da monitorização das variáveis no circuito primário. Dessa curva foram retirados os quatro parâmetros importantes: a localização e valor do ponto máximo, velocidade de crescimento da resistência e o desvio padrão da curva. Posteriormente para verificar a fiabilidade dos resultados propuseram o uso de um algoritmo de inteligência artificial para estimar a qualidade da soldadura

usando a resistência dinâmica primária. Foi usado um sistema de redes neurais onde as entradas foram os quatro fatores mencionados anteriormente. A resistência dinâmica obtida no primário foi comparada à resistência dinâmica adquirida no secundário, apresentando um erro de $2 \mu\Omega$.

Cho e Rhee [19] continuaram os estudos da obtenção da resistência dinâmica através do circuito primário. Foram utilizados modelos de regressão linear e não linear com dez fatores e foi determinada a relação entre eles e a qualidade da soldadura através de uma análise de regressão. Foi usada posteriormente uma rede neuronal com os mesmos dez fatores e os resultados foram comparados com as regressões. Verificaram uma boa correlação. Contudo estes valores obtidos são valores instantâneos, correspondendo aos valores de pico, não se obtendo uma precisão de valores muito boa.

A introdução dos sistemas de inteligência artificial na monitorização da qualidade da soldadura tem sido muito estudada. As principais técnicas usadas na SRP são as redes neurais e lógica *fuzzy*. Contudo a utilização destas técnicas é limitada.

Wang e Wei [13] sugeriram calcular a resistência dinâmica através da distribuição da temperatura, apresentando uma solução numérica. O modelo apresentado permite calcular a deformação e geometria do material, a área de contato na interface e os campos de tensão e deformação considerando as variações de volume devido à transformação de fase e plasticidade induzida pela transformação.

Ling et al [20] propuseram um método de monitorização do processo através da impedância (devido a este método ser mais preciso do que a medição da resistência de contacto). O seu estudo tinha por base o reconhecimento de um padrão da parte real por um sistema neuronal artificial (ANN). Concluíram que a impedância de entrada pode ser usada para monitorizar a qualidade do processo. Contudo, o significado físico da parte imaginária, ou impedância de entrada, durante o processo de soldadura apresenta variações que não são claras e os respetivos cálculos são complexos e difíceis de entender.

Li [21]] fez uso da imagem U-I, que reflete a energia de entrada de cada meio ciclo, para monitorizar a qualidade da soldadura. Contudo, como as curvas U-I são medidas a cada meio ciclo a avaliação da qualidade pode não ser a correta porque a carga necessária é muito maior para maior tempo de soldadura. Além disso, o significado físico das alterações da imagem U-I durante um processo de soldadura não é clarificado. Assim, estudou sistematicamente a curva U-I para verificar a sua capacidade de avaliar a qualidade da soldadura e correlacionou-a com a qualidade da soldadura, através de redes neurais.

2.3.3 Tempo de passagem de corrente

O tempo de passagem de corrente na peça depende de fatores como a intensidade da corrente, força de aperto e do tipo de material a soldar, da sua espessura e acabamento [3].

O calor gerado é proporcional ao tempo de passagem de corrente. Se o tempo de passagem de corrente foi em demasia, a temperatura na interface das peças será maior do que a temperatura de fusão pode haver expulsão do material e deterioração dos eletrodos. Na escolha do tempo de soldadura tem que se ter em conta as perdas de calor existentes por condução nas peças e para os eletrodos e de radiação, embora esta última seja mínima [9]. Este tempo é normalmente medido em ciclos. Em Portugal a frequência da rede elétrica é de 50 Hertz, logo um ciclo terá a duração de 0,02 s.

2.3.4 Força de Aperto

A força de aperto é responsável por várias funções, como manter em contacto as peças a soldar, manter a continuidade da corrente elétrica ou opor-se à deformação resultante da dilatação durante a soldadura [3]. A força de aperto é exercida durante todo o ciclo da soldadura, conforme ilustrado na Figura 2.2, variando a sua intensidade ao longo do ciclo.

As resistências de contacto são dependentes da força de aperto aplicada, sendo estas duas variáveis inversamente proporcionais entre si, conforme ilustra a Figura 2.10. Nos primeiros instantes do processo, o decrescimento da curva depende das rugosidades existentes nas superfícies das peças, a nível microscópico. Quando a força de aperto é baixa, o contacto entre as superfícies dar-se-á apenas nos seus picos, sendo a resistência elevada devido à baixa área de contacto. Quando a força de aperto é elevada, os picos sofrem uma deformação, aumentando a área de contacto entre as superfícies e consequentemente diminuindo a resistência (Figura 2.11) [9]. Pode-se observar que à medida que a força aumenta, a curva fica mais achatada, havendo uma diminuição geral da resistência. Esta diminuição da resistência leva a uma diminuição da potência ($P = I^2 R$) o que leva a um desvio do pico β para a direita e consequentemente a uma formação do *nugget* mais tardia em comparação com valores de força menores [14]. Esta variável é das mais difíceis de controlar.

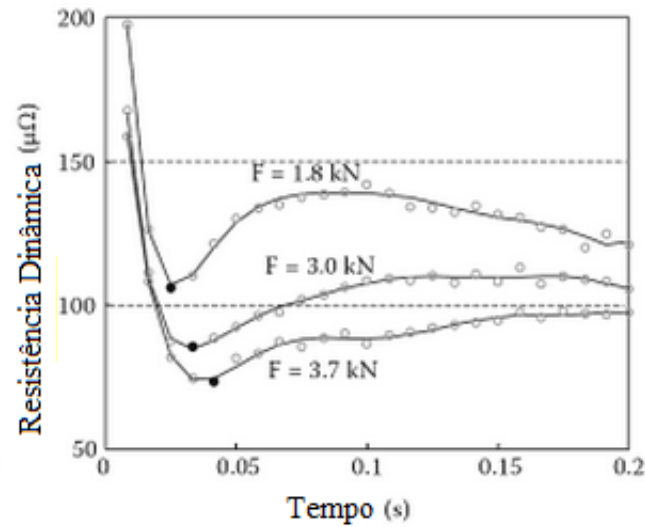


Figura 2.10 – Efeito da força de aperto na resistência dinâmica em material carbonado AK (Adaptado de [12])

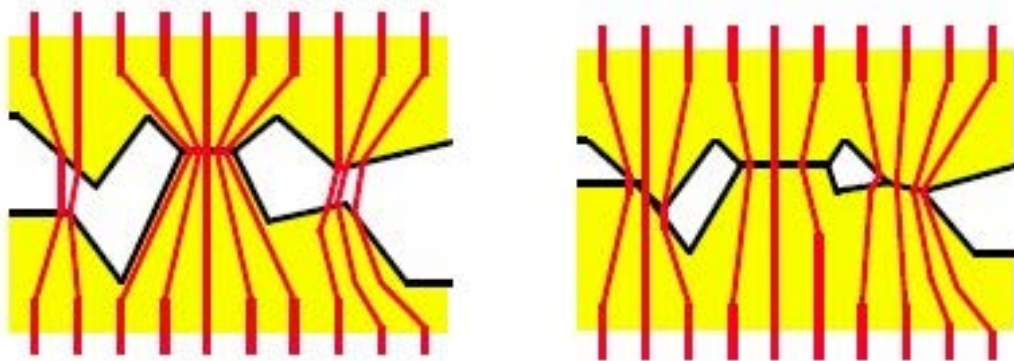


Figura 2.11 – Efeito da força de aperto na resistência das superfícies [16]

2.3.5 Eletrodos

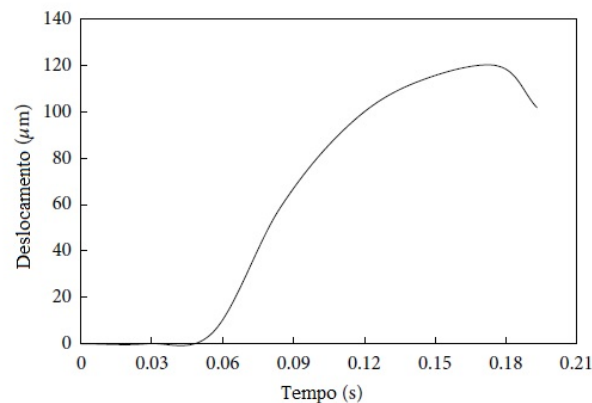
Os eletrodos têm como função a aplicação da força nas peças, condução da corrente elétrica e ajudam na refrigeração da zona soldada.

Segundo Hou *et al* [22] e Wang *et al* [23] o deslocamento dos eletrodos também pode ser usado para monitorizar a qualidade do processo de soldadura. O seu deslocamento dá uma boa indicação acerca da expansão térmica, fusão e expulsão.

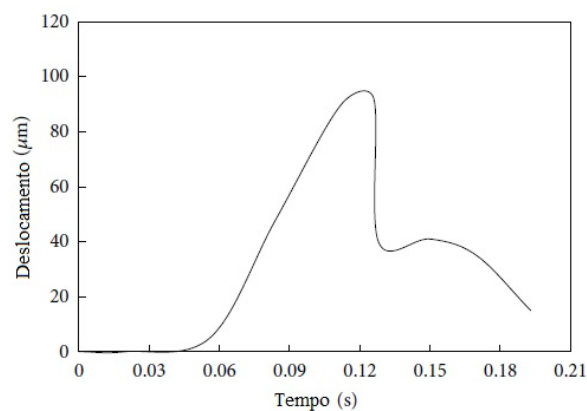
Wang *et al* [23] apresentam uma análise das curvas de deslocamento dos eletrodos. Na Figura 2.12 a) os eletrodos aproximam-se devido à força imposta. No início da descarga o material a soldar sofre uma expansão térmica, movimentando os eletrodos em sentidos opostos a uma

velocidade constante até a um valor máximo. Este ponto é caracterizado pela extinção da corrente, deixando haver expansão térmica. Posteriormente os eletrodos vão-se aproximar devido ao arrefecimento das peças.

Quando existe expulsão, Figura 2.12-b, a curva apresenta uma descida brusca devido à expulsão do material que faz com que haja uma redução de material entre os eletrodos causando uma aproximação dos dois.



a)



b)

Figura 2.12 – Curva do deslocamento do eletrodo [7] a) sem expulsão b) com expulsão

A escolha dos eletrodos deve ser apropriada ao tipo de aplicação. Esta escolha deve ter em conta o material, geometria e diâmetro.

Os eletrodos são geralmente fabricados em ligas de cobre, apresentando alta condutibilidade térmica e elétrica para diminuir a resistência elétrica, evitando que haja queimaduras na superfície da peça ou na face do eletrodo [6]. Devem ter a capacidade de fácil

deformação para se ajustarem às superfícies das peças e terem alta resistência e dureza para resistir às deformações causadas pelas sucessivas aplicações de força e aquecimento/arrefecimento [9].

A intensidade da corrente é dependente da geometria e do diâmetro dos eletrodos. Existem seis possíveis geometrias, estando elas representadas na Figura 2.13.

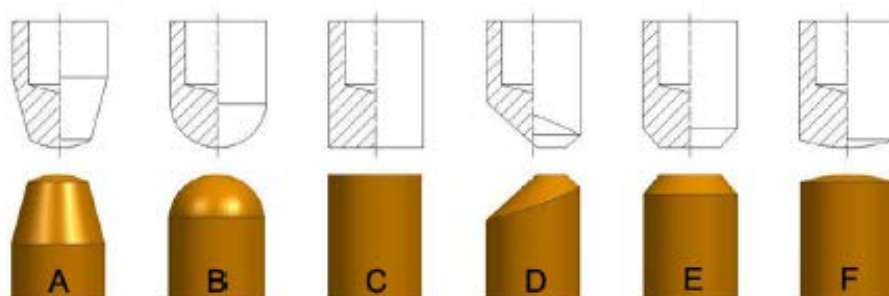


Figura 2.13 –Tipos de pontas de eletrodos (Adaptado de [11]): A-Aguçado B-Cúpula C-Liso D-Desviado E-Truncado F-Radial

O arrefecimento do eletrodo é muito importante para uma boa soldadura, pois permite um maior escoamento do calor no arrefecimento da peça soldada e permite o aumento de tempo de vida útil. O fluido refrigerante deve ser levado o mais próximo possível da ponta do eletrodo [1]. Na Figura 2.14 está ilustrado o esquema de um eletrodo e o seu sistema de refrigeração.

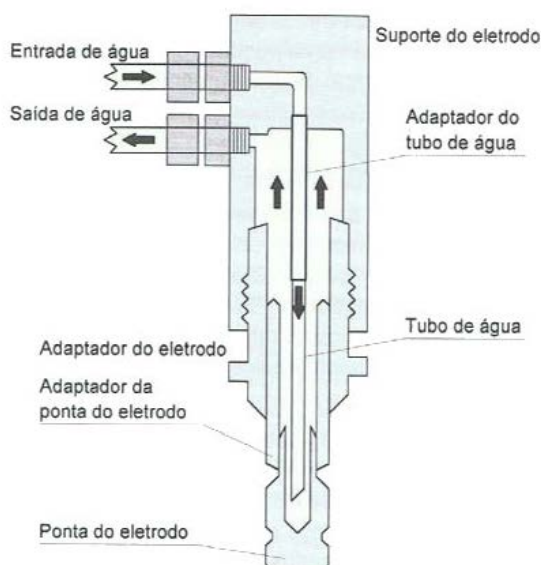


Figura 2.14 – Refrigeração de um eletrodo [1]

As condições da superfície dos eletrodos são de extrema importância, estando a resistência de contacto e as reações metalúrgicas entre a interface eletrodo/peça dependentes delas. O uso excessivo ou incorreto dos eletrodos provoca o seu desgaste. Um eletrodo desgastado possui uma maior área de contacto com a peça (Figura 2.15) e consequentemente uma diminuição da densidade da corrente. Verifica-se também um aumento das resistências de contacto eletrodo/peça, aumentando o calor gerado nessa região, com possível fusão e uma consequente aderência do eletrodo à peça. Na Figura 2.16 estão representados dois eletrodos com as superfícies desgastadas. É importante a verificação da sua superfície por forma a obter soldaduras com qualidade.

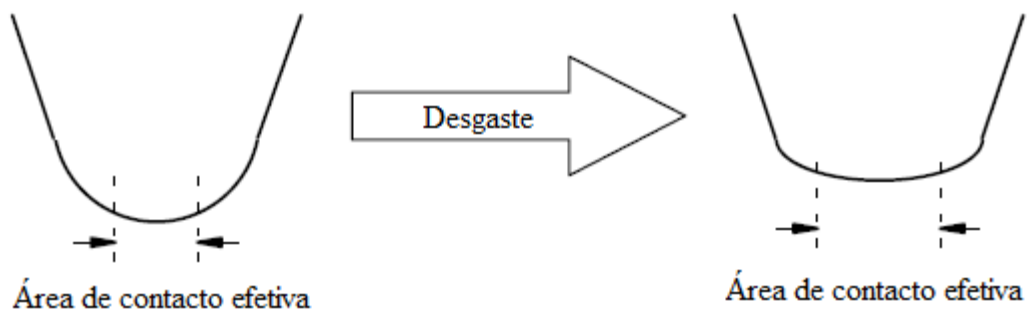


Figura 2.15 – Área de contacto do eletrodo em função do desgaste (Adaptado de [24])

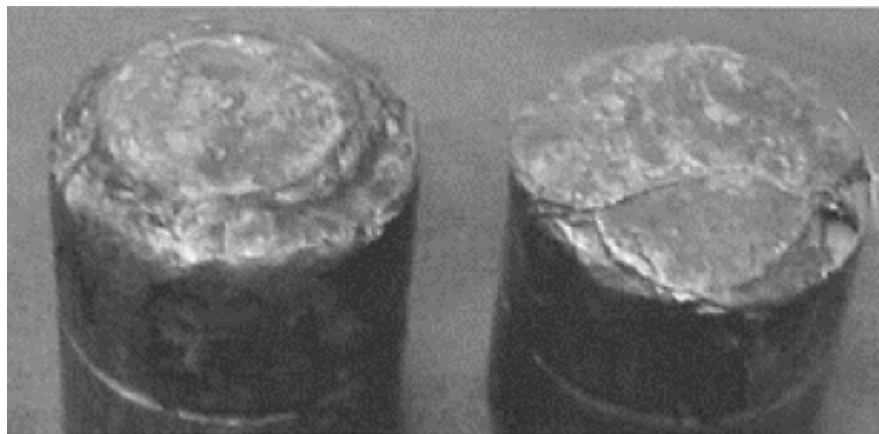


Figura 2.16 – Superfícies de eletrodos desgastadas [12]

2.3.6 Superfícies

As superfícies das peças devem estar limpas e não devem conter substâncias que possam prejudicar a soldadura, como a presença de pinturas, óleos, óxidos, gorduras ou sujidade. A existência destas substâncias nas superfícies gera uma grande quantidade de calor devido à sua elevada resistência elétrica. A geração de calor em demasia provoca uma soldadura parcial na

superfície, degradando a sua aparência, encurta a vida do eletrodo devido à sua degradação e pode levar à expulsão do material entre as duas peças [11].

2.3.7 Materiais a soldar

Os metais e as ligas metálicas são amplamente utilizadas em projetos de engenharia. As ligas metálicas podem ser divididas em ligas ferrosas, se forem à base de ferro e ligas não ferrosas, se forem à base de outros metais. As ligas ferrosas podem ser divididas em duas categorias: aços, se a percentagem de carbono é inferior a 2 wt % e ferros fundidos, se a percentagem de carbono é superior a 2 wt % [25].

O aço é uma liga metálica de ferro e carbono que pode ter na sua composição quantidades de um ou mais elementos de liga adicionados, como magnésio, cromo, vanádio, tungsténio com a intenção de obter características especiais. Pode haver elementos residuais como o enxofre e o silício que são de difícil remoção, constituindo impurezas.

Dentro dos aços existe uma divisão quanto ao seu teor de ligas, podendo ser aços de baixa liga, aços de média liga, aços de alta liga ou aços ao carbono. Os aços de baixa liga são caracterizados por terem um teor de elementos de liga inferiores a 5 %, os de média liga têm entre 5 – 10 % e os de alta liga têm uma percentagem superior a 10 % desses elementos [1]. Os aços ao carbono são caracterizados por terem quantidades de carbono entre 0,03 % até 1,2 %, teores de manganês entre 0,25 até 1 % e quantidades reduzidas de outros [25].

As transformações numa liga ferro-carbono são influenciadas basicamente pela temperatura e pelo teor de carbono. Um aço-carbono com teor de carbono igual a 0,8% denomina-se de aço eutectóide. O aço carbono com teor de carbono inferior a 0,8% denomina-se de aço hipoeutectóide e com teor de carbono superior a 0,8% denomina-se aço hipereutectóide.

Na Figura 2.17 a) está representado o diagrama ferro-carbono onde se pode observar as diferentes fases consoante a sua temperatura e concentração de carbono. Este diagrama é fundamental para ver o comportamento de um material, pois mostra as fases existentes e as reações de equilíbrio entre elas. Na figura Figura 2.17 b) está representado um diagrama ferro-carbono hipoeutectóide onde se pode verificar as várias fases presentes e as suas respetivas ilustrações.

As ligas de ferro-carbono num arrefecimento lento apresentam as seguintes fases sólidas [1], [25]:

Austenite (γ) – solução sólida intersticial de carbono no ferro γ , com estrutura cristalina CFC;

Ferrite α – solução sólida intersticial de carbono no ferro α com estrutura cristalina CCC;

Ferrite δ – solução sólida intersticial de carbono no ferro δ , com estrutura cristalina CCC;

Cementite (Fe_3C) – composto intermetálico com composição de 6,67% C e 93,3% Fe com estrutura cristalina ortorrômbica. É um componente frágil e duro;

Perlite – estrutura lamelar de placas alternadas de ferrite α e cementite, formada à temperatura eutectóide através de um arrefecimento lento;

Quando o arrefecimento se dá de forma rápida, surgem duas estruturas novas estruturas:

Martensite – fase metaestável que consiste numa solução sólida sobressaturada de carbono dissolvido intersticialmente no ferro CCC ou no ferro tetragonal de corpo centrado. É uma fase com grande dureza e fragilidade;

Bainite – produto da decomposição da austenite com estrutura eutectóide não-lamelar de ferrite α e cementite. É formada a velocidades de arrefecimento mais lentas do que é necessário para formação da martensite e mais rápidas do que o necessário para formação de ferrite e perlite. É dividida em bainite superior que se forma em temperaturas entre 550°C e 350°C e em bainite inferior em temperaturas entre os 350°C e 250°C;

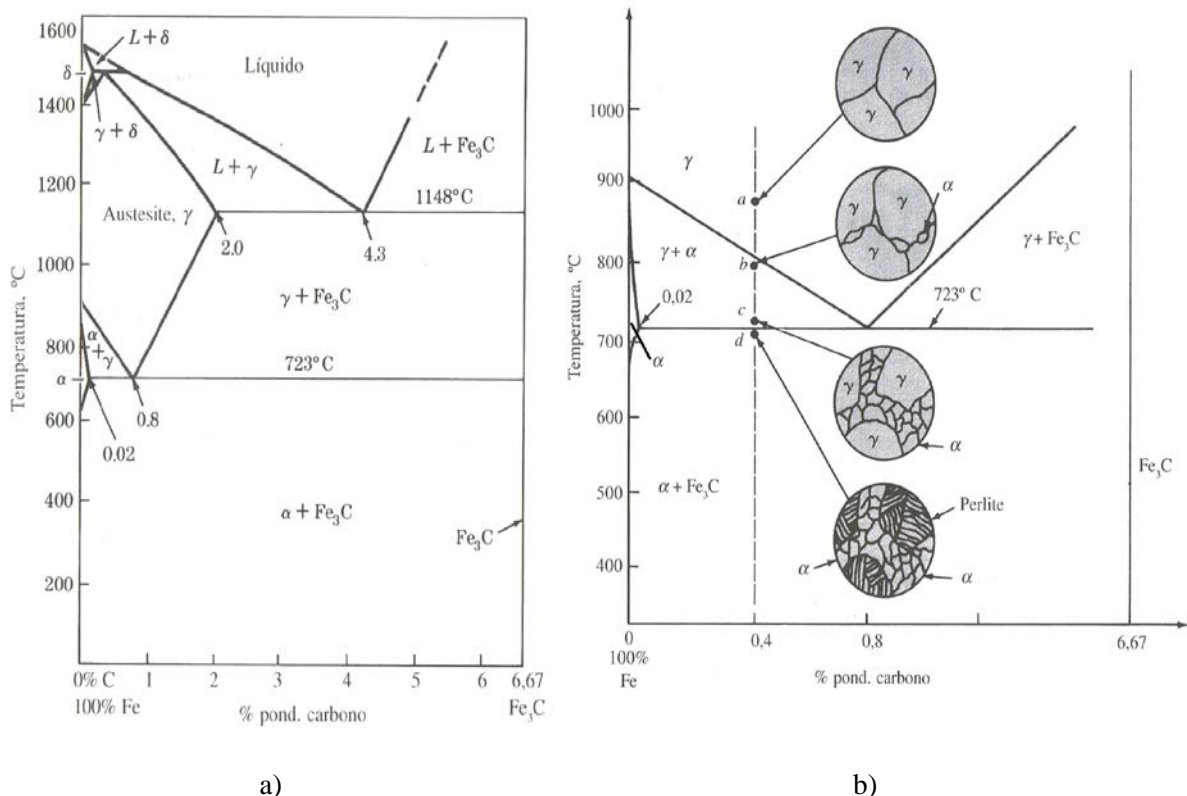


Figura 2.17 – a) Diagrama de fases Fe-C b) Transformações durante o arrefecimento lento de um aço hipoeutectóide

O arrefecimento da peça é muito importante. A solidificação do *nugget* pode ser dividida em duas partes: nucleação da fase sólida e o crescimento do grão. O processo de cristalização é controlado pela dissipação de calor entre as peças e os eletrodos. A direção, a taxa de arrefecimento e a composição do material afetam o tipo, tamanho e orientação dos cristais formados [12]. O arrefecimento ideal é aquele em que a solidificação ocorre uniformemente, conforme ilustrado na Figura 2.18.

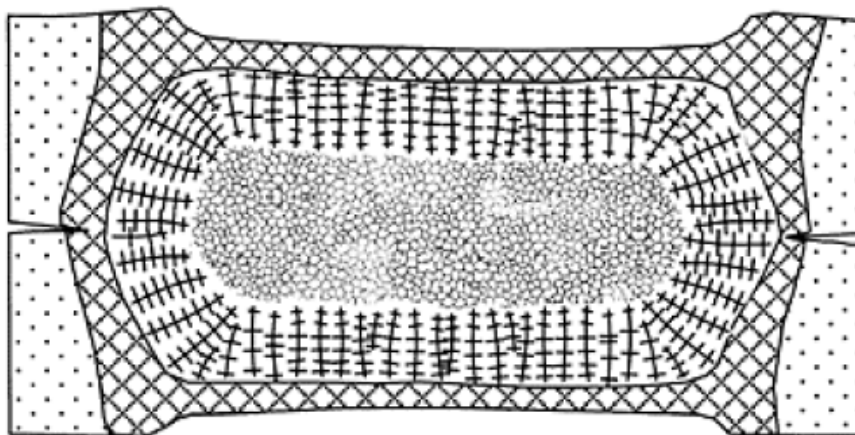


Figura 2.18 – Estrutura esquemática de uma solidificação ideal [12]

2.3.8 Equipamentos

A máquina de soldadura por resistência por pontos é formada por vários dispositivos que permitem a realização de uma soldadura. Na Figura 2.19 pode-se observar um equipamento deste tipo de soldadura.

As máquinas de soldadura por resistência por pontos são compostas por três circuitos principais:

Circuito elétrico

O circuito elétrico é composto por todos os equipamentos por onde passa a corrente. Assim faz parte deste circuito a fonte de alimentação, o transformador, os cabos de ligação e o circuito secundário, onde estão incluídos os eletrodos [3].

Circuito mecânico

Este circuito controla as funções principais, como o iniciar/cessar da corrente para o transformador, regula a corrente e o seu tempo de passagem e ainda é responsável pelo controlo do mecanismo de força dos eletrodos [6].

Circuito de controlo

Este circuito é composto pela parte estrutural e pelo dispositivo que fixa a peça e aplica a pressão para o aperto.

A parte estrutural tem a função de suportar o transformador e todos os componentes pertencentes ao circuito elétrico e ao de controlo. O dispositivo de fixação e de aplicação da pressão pode ser do tipo manual, usando um motor elétrico, ou com recurso a dispositivos pneumáticos ou hidráulicos. As máquinas de acionamento manual são geralmente usadas para casos onde a produção é muito variável, pois há facilidade de alteração das condições ou dos parâmetros de soldadura. O uso dos dispositivos pneumáticos ou hidráulicos é mais frequente em produções homogêneas, podendo ser especializadas apenas para uma tarefa [1], [3].

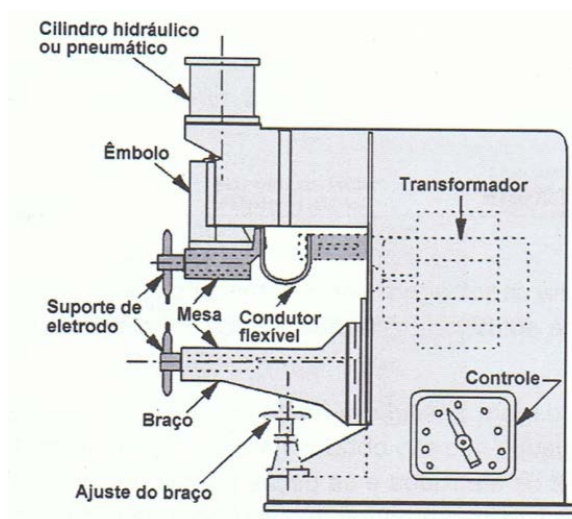


Figura 2.19 - Equipamento de soldadura por resistência por pontos [1]

2.4 Redes electrossoldadas

As redes eletrossoldadas são constituídas por varões de aço dispostos em malha ortogonal sendo os pontos de contacto soldados por um processo de soldadura elétrica por pontos conforme ilustrado na Figura 2.20.

Estas estruturas soldadas são usadas na construção civil, que em conjunto com o betão formam estruturas mais sólidas, flexíveis e capazes de aguentarem vários tipos de esforços [5].

A sua utilização é vasta, sendo aplicadas em lajes maciças e aligeiradas, nas paredes e muros de suporte, em túneis e pavimentos rodoviários, conforme observado na Figura 2.21.

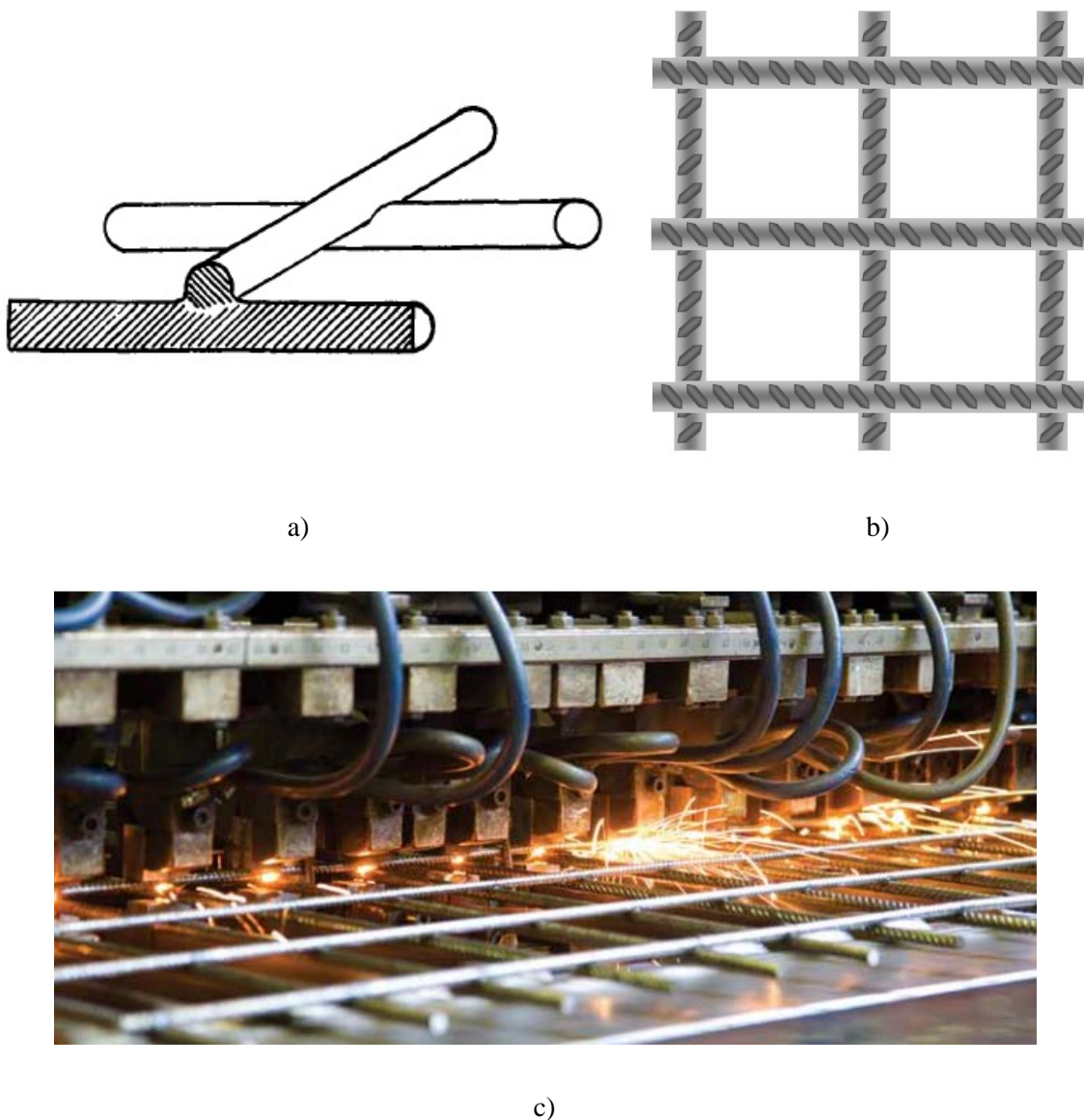


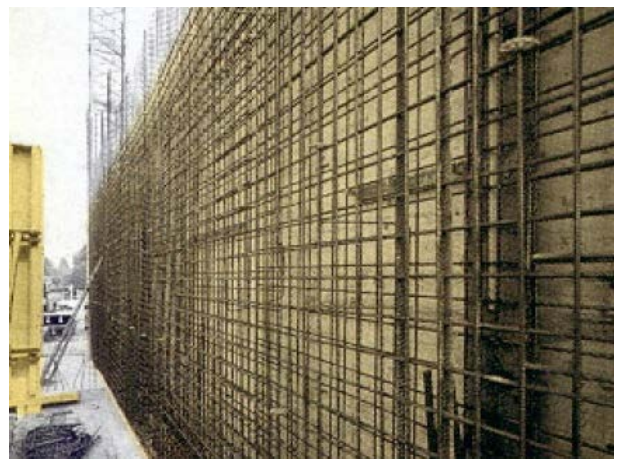
Figura 2.20 - a) Corte de varão eletrossoldados [11] b) Rede eletrossoldadas [26] c) Execução de pontos de soldadura[27]

Devido à grande utilização das redes electrossoldadas na construção civil, existem normas específicas para estas estruturas que definem as condições que estas devem apresentar.

As redes electrossoldadas são fabricadas a partir de varões de aço que podem ser do tipo A400 NR, A400 NR SD, A500 NR, A500 NR SD, A500 ER que apresentam superfície corrugada ou A500 EL que têm superfície lisa. Na classificação dos aços, a letra A indica o tipo de aço (aço para armadura de betão armado), o número de três algarismos indica o valor característico da tensão de cedência em MPa, NR indica que são aços de dureza natural, SD indica que têm ductilidade especial, ER indica que é endurecido a frio e tem superfície corrugada, e EL indica que é endurecido a frio e que tem superfície lisa [28], [29].



a)



b)



c)



d)

Figura 2.21 – Exemplos de utilização de redes eletrossoldadas [17]: a) Laje b) Muro c) Túneis d) Pavimento rodoviário

Os varões são produzidos a partir de fio liso (fio máquina) laminado a quente de aço macio, por um processo de endurecimento por laminagem a frio [29].

Após serem soldadas, as redes podem ser armazenadas sob forma de rolos ou painel [26] conforme ilustrado na Figura 2.22.



a)



b)

Figura 2.22 – Armazenamento de redes eletrosoldadas [26]

Procedimento Experimental

3.1 Introdução

Este capítulo define a parte experimental e o modo de aquisição dos dados usados neste estudo.

São apresentados os materiais e os equipamentos usados ao longo do estudo, assim como a montagem experimental e o plano de ensaios.

Primeiramente é caracterizado o material dos varões, indicando a sua forma de fabrico, o motivo da escolha das dimensões e a análise físico química.

De seguida é feita uma apresentação do equipamento experimental. É indicado o equipamento de soldadura utilizado, assim como os equipamentos utilizados para adquirir os dados que se necessita (corrente, tensão e força de aperto). É descrita a montagem experimental, com indicação de todas as ligações efetuadas e programas utilizados.

Por fim é apresentada a matriz de ensaios planeada.

3.2 Material a soldar

Os varões a soldar são de aço A500 EL, de superfície lisa.

Estes varões são adquiridos inicialmente em bobines, laminados a quente. São depois submetidos a uma laminagem a frio por deformação plástica, depois são endireitados e finalmente cortados, onde ficam disponíveis para serem soldados.

Com o endireitamento dos fios, as suas características mecânicas podem alterar sensivelmente. É por isso necessário garantir que apesar dessas alterações após o endireitamento os fios continuam a satisfazer a Especificação relativa a este tipo de aço.

Neste caso, a documentação normativa do LNEC é a Especificação E 478 - 2008 [28].

Os diâmetros a utilizar nos ensaios são de 6 mm e 8 mm. A escolha destes diâmetros foi devido ao facto de serem das medidas mais utilizadas pela empresa, e poder assim os resultados virem a ser utilizados como base.

Para garantir resultados mais fidedignos procurou-se que os varões fossem do mesmo lote de fabricação e que se procedesse a uma limpeza profunda das superfícies a serem soldadas para ficarem livres de impurezas que pudessem comprometer a precisão dos resultados obtidos.

3.2.1 Caracterização físico química do material

Segundo a Especificação mencionada anteriormente, os valores nominais do diâmetro, da área de secção transversal e da massa por metro linear de fios devem ser os mencionados na

Tabela 3.1. Foi considerada para a massa volúmica do aço o valor de $7,85 \text{ kg/dm}^3$.

Tabela 3.1 – Valores nominais e tolerâncias [28]

Diâmetro Nominal (mm)	Área de Secção Transversal (mm ²)	Massa (kg/m)	Tolerância de Massa (%)
6	28,3	0,222	± 4,5%
8	50,3	0,395	

Relativamente à composição química dos varões, os valores máximos especificados estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química dos fios laminados

C (%)	P (%)	S (%)	N ⁽¹⁾ (%)	Cu (%)	C _{eq} ⁽²⁾ (%)
0,24	0,055	0,055	0,014	0,85	0,52

⁽¹⁾ Azoto livre.

Se existirem, em quantidades suficientes, elementos fixadores de Azoto tais como Alumínio, Vanádio, etc., podem ser admitidos teores superiores.

$$^{(2)} C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde os símbolos dos elementos químicos representam os seus valores em percentagem.

O processo de soldadura na *Codimetal* é um processo certificado, pelo que os valores não diferem dos valores da norma mencionados anteriormente.

3.3 Equipamento Experimental

3.3.1 Equipamento de Soldadura

O equipamento usado para soldadura dos varões é um protótipo existente na *Codimetal* que permite simular a soldadura por resistência por pontos dos varões existentes nas linhas de produção da empresa. Na Figura 3.1 está representado o protótipo, que é constituído pelo sistema elétrico, sistema mecânico e sistema de controlo.



Figura 3.1 – Protótipo de SRP

O circuito elétrico é constituído por equipamentos como disjuntores, fusíveis, relés, fonte de alimentação, transformador, hardware de controlo e um circuito secundário.

Os disjuntores, relés, fusíveis, fonte de alimentação e hardware de controlo encontram-se no armário de comando (Figura 3.2). O transformador está ligado à fonte de alimentação e faz a ligação ao circuito secundário, onde se encontram os eletrodos.

A fonte de alimentação é da marca BOSCH, modelo PLS 2500.

O controlador é da marca BOSCH, modelo PSS 5000.

Os eletrodos são de cobre, de forma retangular e com as medidas indicadas na Figura 3.3.

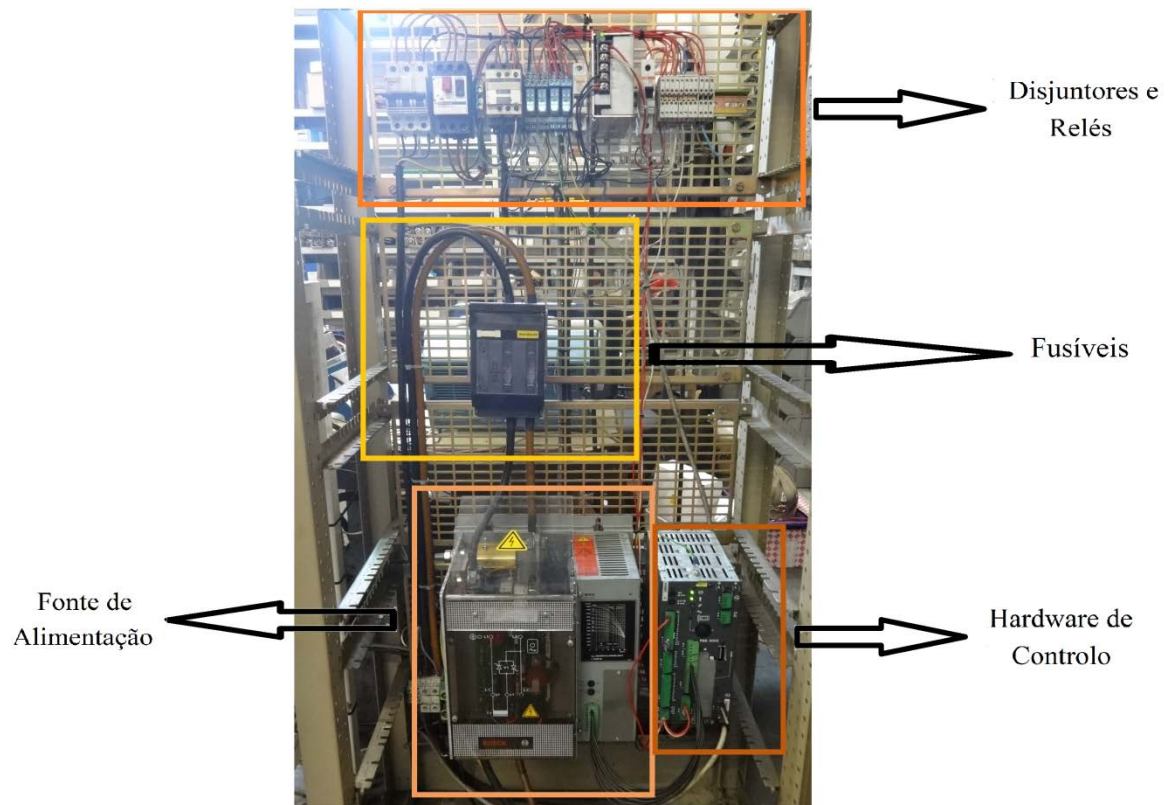


Figura 3.2 – Armário de comando

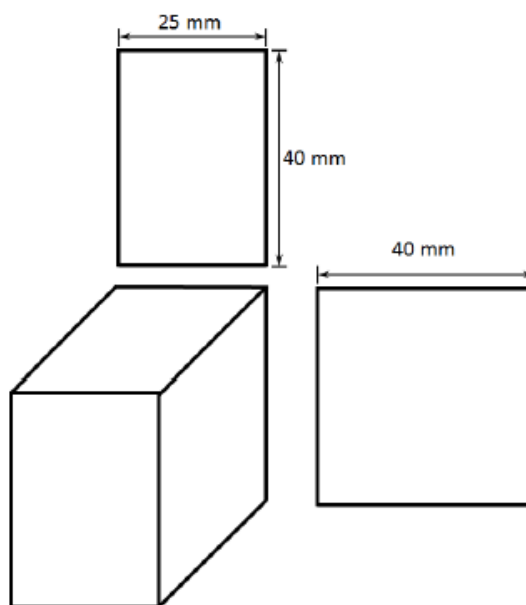


Figura 3.3 – Dimensões dos eletrodos [5]

O sistema mecânico é constituído pela parte estrutural e pela parte pneumática.

A parte estrutural suporta o transformador, o circuito secundário e os componentes pneumáticos.

O sistema de controlo é efetuado pelo controlador. Na Figura 3.4 está representado um esquema do funcionamento do controlador com todas as funções que executa.

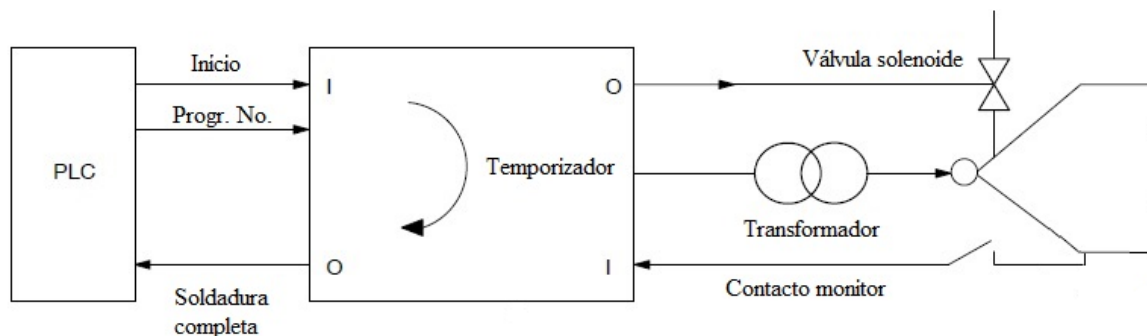


Figura 3.4 – Controlador da soldadura

3.3.2 Equipamento de controlo e aquisição de dados

Para controlo do sistema e de aquisição de dados foram usados dois programas, o LabVIEW 2010 e o BOS 5000, descritos em seguida.

São também descritos os aparelhos de medição dos dados que interessam para análise de resultados - tensão, corrente e força de aperto.

3.3.2.1 BOS 5000

O BOS 5000 (Figura 3.6) é um programa da marca Bosch que controla o protótipo. Este programa permite regular os vários parâmetros do processo, como a percentagem de calor fornecida, o número de ciclos da soldadura, a pressão exercida, o coeficiente de desgaste dos eletrodos, os tempos de aperto dos eletrodos. Neste caso optou-se pela programação rápida (Figura 3.7) porque o único parâmetro alterado ao longo das soldaduras foi a percentagem de calor (intensidade da corrente) (Figura 3.8).

A intensidade da corrente é controlada a partir da percentagem de calor, existindo uma modulação da corrente (Figura 3.5) que permite a diminuição do valor quadrático médio ou também conhecido por RMS. Este valor é uma estatística da magnitude da quantidade variável da corrente. No caso da corrente alternada e sendo $I(t)$ uma corrente sinusoidal o valor RMS é calculado a partir da Eq. 3.3 e o seu resultado é a Eq. 3.3.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$I_{RMS} = \frac{I_P}{\sqrt{2}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

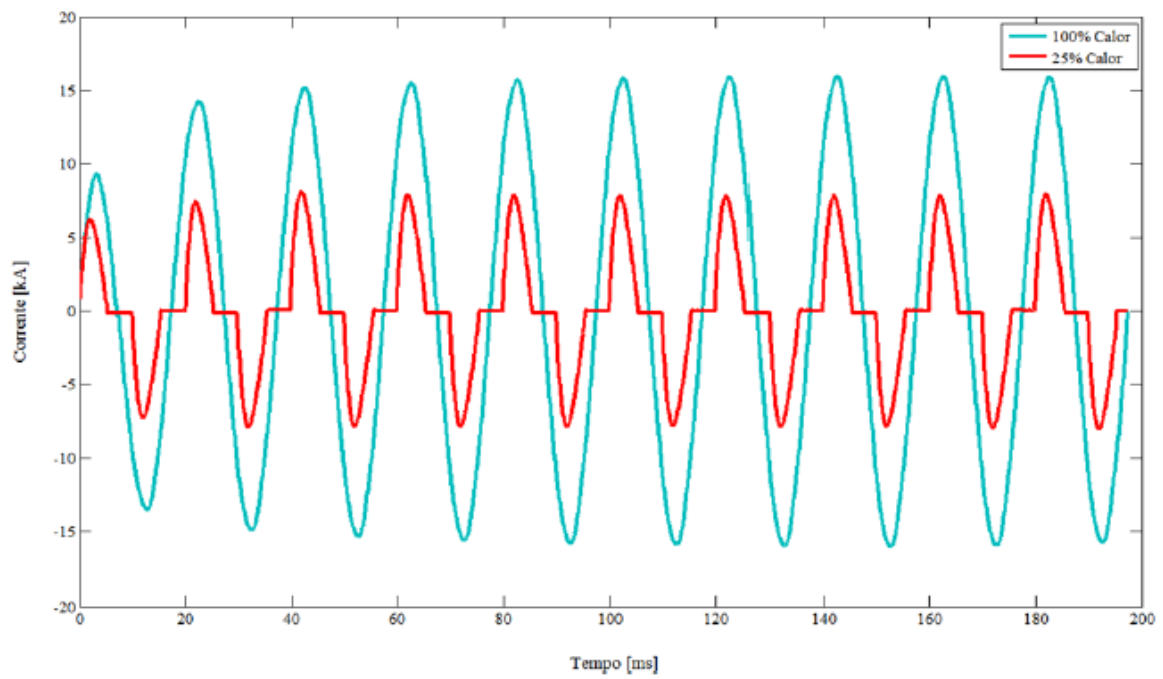


Figura 3.5 - Modulação da corrente através do hardware de controlo [5]

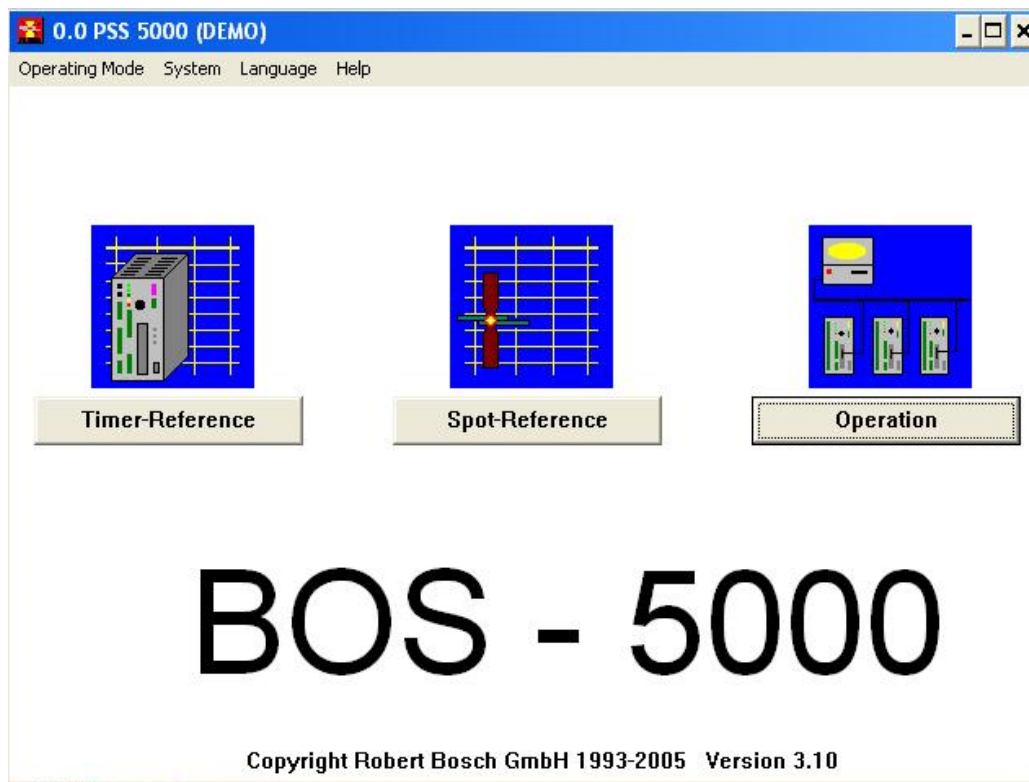


Figura 3.6 – Menu principal do programa BOS 5000

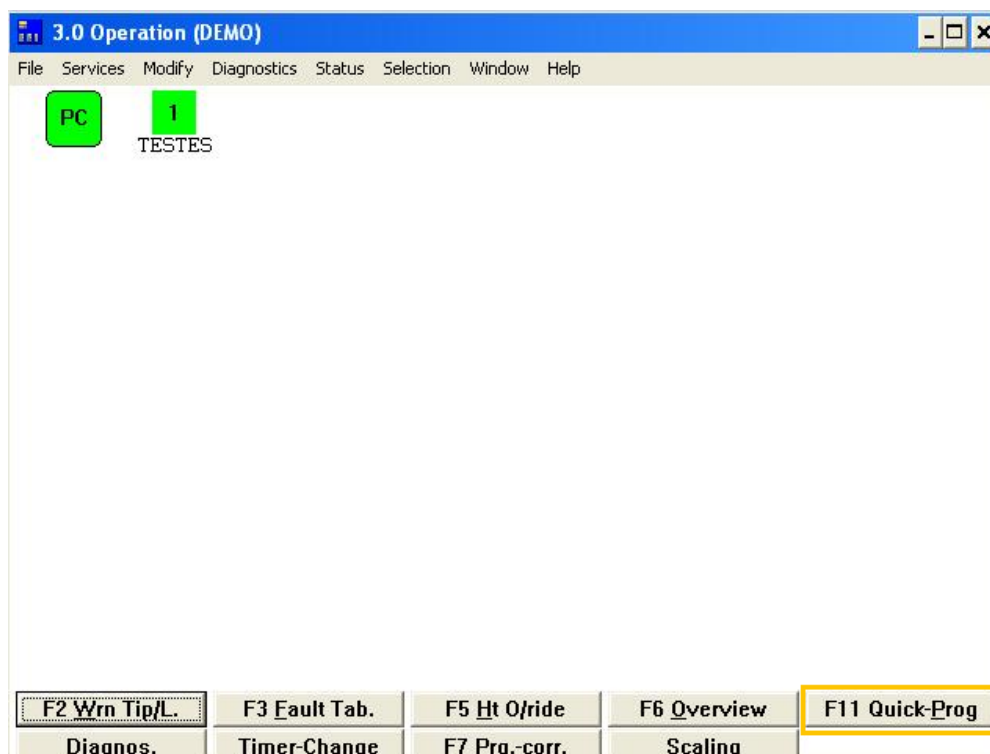


Figura 3.7 – Menu de programação do programa BOS 5000

3.20 Quickprogramming Window 1

Timer: TESTES

Prg.No: 0

For all Programs

Inhibit Sequ.(S): Off

Max Weld Time: 99.0

Inhibit Regul.: Off

Max Rewelds: 1

Weld on/off: On

Regulation-Mode

Regulation: Standard

Regulat. PHA PHA PHA

Reweld: Off

Weld Seq. Operating Mode

Inhibit Sequ.(P): Off

Weld On/Off: On

Slope: On

Elec.No: 0

Impulse: 1

1.HC a. Cool: 55.00

Sequence Single

Sequence Timing and Heat Parameters

%Ht 0.00 30.00 40.00 0.00 0.00

kA 25.00 3.00 25.00 25.00 25.00

1.SQZ 0

SQZ 1

WELD 0

COOL 1 0

UPST 0

WELD 10

DNST 0

COOL 2 0

COOL 3 0

WELD 0

HOLD 1

OFF 0

Heat Stepper Param.

Wear-Factor: 1.0

Base Pressure: 0.00

Heat Monitor. Pressure

1.H/St Phase: 100.00 100.00 100.00

last Tip Dress: 100.00 100.00 100.00

new Electrode: 100.00 100.00 100.00

Electrode Parameters

Heat Stepper: Off

1. Wear: 0.0

Max. Wear: 0.0

Warn. Wear: 0.0

Dress-Request: 0.0

Wear/comp.: 1

HtStp Cv: 0

T/Dr. Cv.: 0

T/Dress 0

OK

Data-->Tim

New Sel

Prog +

Prog -

Page <>

Act.Val.

Help

Inhibit Sequence (S)

Online

Figura 3.8 – Interface do programa BOS 5000

3.3.2.2 LabVIEW

O *LabVIEW* é um software da *National Instruments* (NI) que permite através da programação desenvolver aplicações de medição ou controle. Neste estudo, foi realizada a programação em *LabVIEW* (Figura 3.9) para permitir a aquisição de dados e controlo do acionamento do macaco hidráulico, nomeadamente o tempo de aperto antes da descarga, tempo de descarga e tempo de espera após descarga (valores fixos). É também responsável pelo envio da ordem de início de soldadura para o programa BOS 5000. O programa permite obter os dados da força de aperto em kN, da corrente em kA e da tensão em V e da tensão da descarga em V.

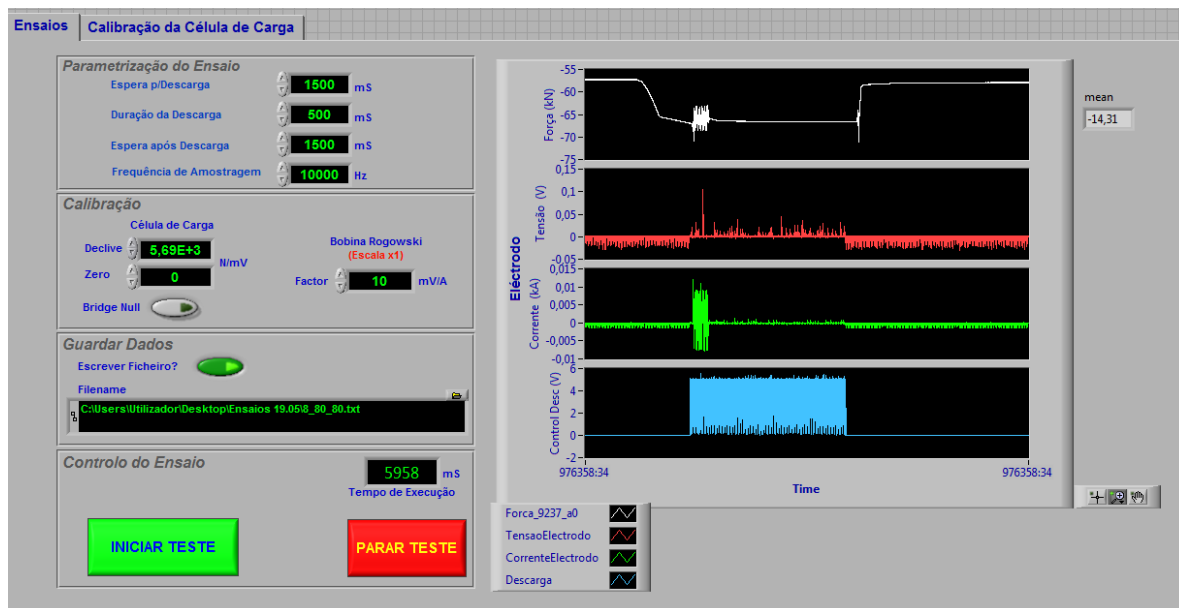


Figura 3.9 - Programa de aquisição de dados e controlo de soldadura

3.3.2.3 Medição da tensão

O gráfico da tensão é obtido através de um osciloscópio Tektronix TDS 3054B, com recurso à utilização de disquetes para obtenção dos valores, conforme ilustrado na Figura 3.10. Optou-se por a medição da tensão ser feita através do osciloscópio em vez de na placa NI CompactDAQ devido a problemas encontrados em trabalhos anteriores [4], [5] relacionados com a incapacidade da placa suportar os picos de tensão que podem ocorrer durante o processo. O osciloscópio, devido à sua elevada impedância, possibilita a aquisição da queda de potencial durante o processo de soldadura.

A medição da tensão é obtida através dos cabos que estão ligados aos eletrodos (Figura 3.10). Esses cabos são ligados diretamente ao osciloscópio.

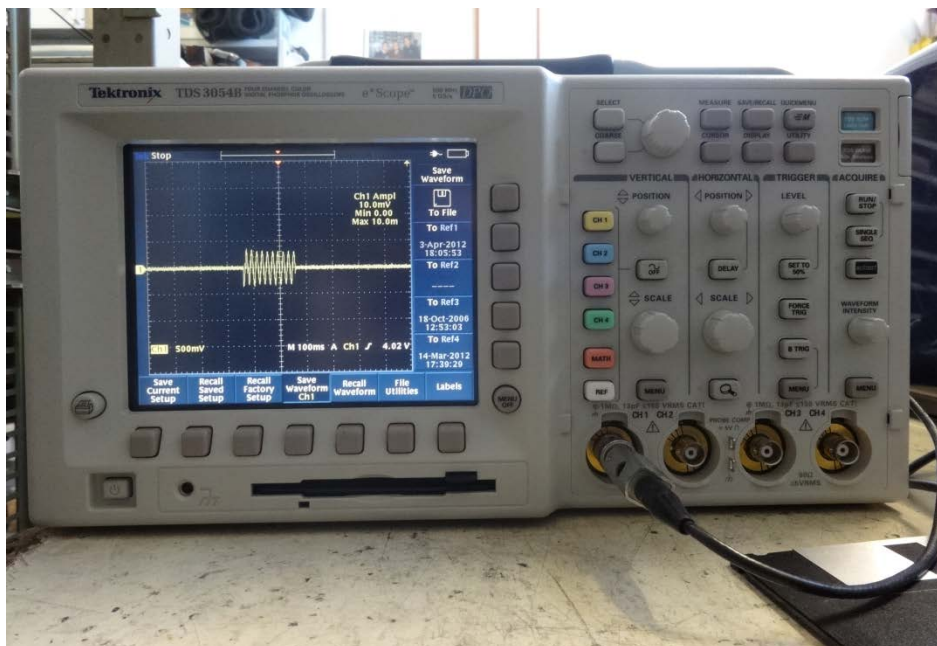


Figura 3.10 –Osciloscópio Tektronix TDS 3054B



Figura 3.11 – Ligação aos eletrodos para medição da tensão

3.3.2.4 Medição da corrente

A corrente é obtida através de uma bobine de Rogowski (Figura 3.12). O princípio de funcionamento da bobina de Rogowski é simples: quando um condutor se encontra no meio do

toróide, o campo magnético gerado pela passagem da corrente induz uma diferença de potencial (ΔV) aos terminais do toróide.[30].



Figura 3.12 – Bobina Rogowski

3.3.2.5 Medição da força de aperto

A obtenção da força de aperto é feita através de uma célula de carga, localizada abaixo do eletrodo inferior (Figura 3.13). A célula de carga consiste num anel de carga deformável onde são colados extensómetros. Consoante a carga aplicada, há deformação do anel de carga e consequentemente há mudança da resistência dos extensómetros. A variação da resistência dos extensómetros permite calcular a deformação do material e em conjunto com as propriedades do material permite calcular a força aplicada.

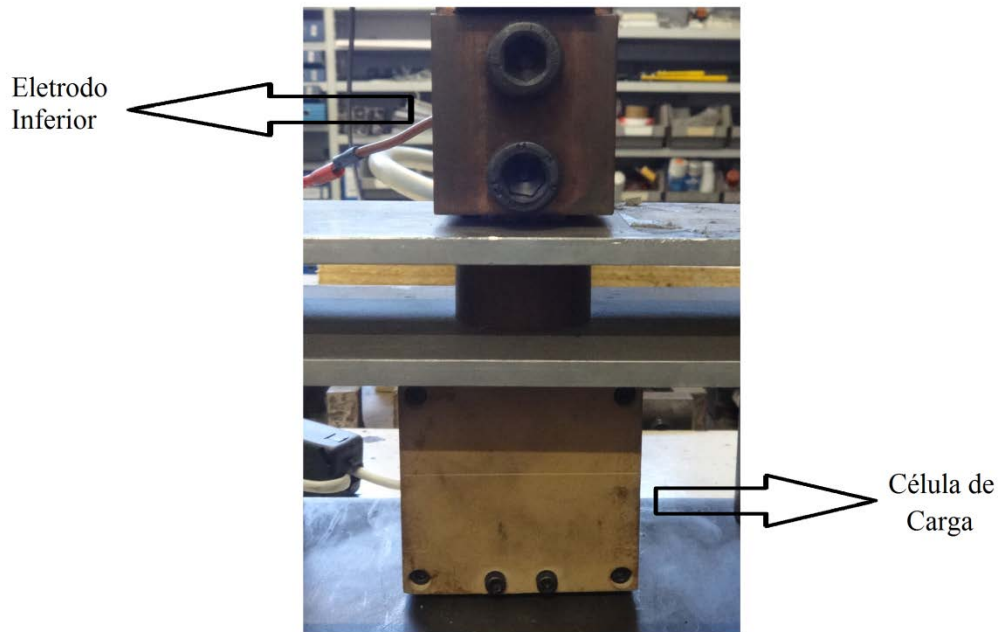


Figura 3.13 – Montagem da célula de carga

3.3.3 Tratamento de dados

Para o tratamento dos dados adquiridos utilizou-se o *Matlab*. O *Matlab* foi utilizado para a obtenção dos gráficos. Foi criado um programa que efetua a leitura dos ficheiros de texto com os dados obtidos no osciloscópio e no *LabVIEW*.

3.4 Montagem experimental

Na Figura 3.14 está esquematizado o sistema de aquisição de dados com as ligações efetuadas.

A ligação (1) é a conexão entre o computador existente na Codimetal e o sistema de controlo do equipamento de soldadura. O computador tem instalado o programa BOS 5000, onde se define a percentagem da soldadura.

A ligação (2) é a conexão entre o computador portátil e o sistema de controlo do equipamento de soldadura. O computador tem instalado o *LabVIEW* que dá ordem para o início do processo de soldadura.

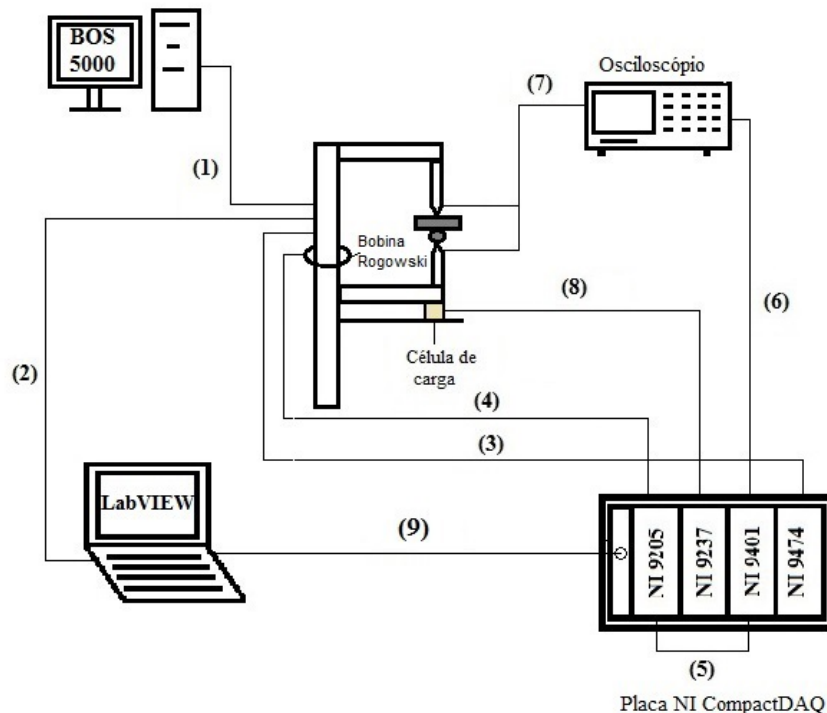


Figura 3.14 – Esquema da montagem experimental

A ligação (3) é a conexão entre o módulo NI 9474 e o sistema de controlo do equipamento de soldadura. Este módulo é o responsável pelo controlo das válvulas.

A ligação (4) é a conexão entre o módulo NI 9205 e a bobina de Rogowski. Esta ligação permite retirar os dados da intensidade da corrente.

A ligação (6) é a conexão entre o osciloscópio e o módulo NI 9401. Este módulo é responsável pelo *trigger* através da ligação (5) ao módulo NI 9205.

A ligação (7) é a conexão entre os eletrodos e o osciloscópio. Esta ligação adquire os dados da tensão e o osciloscópio grava-os na disquete.

A ligação (8) é a conexão entre a célula de carga e o módulo NI 9237. Esta ligação permite retirar os dados da força de aperto ao longo do processo de soldadura.

A ligação (9) é a conexão entre a placa NI CompactDAQ e o computador portátil. O computador recebe os dados obtidos durante o processo de soldadura e guarda-os através do programa *LabVIEW*.

3.5 Plano Experimental

As dimensões dos varões a soldar são de 6 mm e de 8 mm. Antes de proceder à soldadura é realizada a limpeza dos varões. Para efetuar as soldaduras de modo a estudar a sua resistência dinâmica, foi elaborado o plano de ensaios representado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Plano de ensaios

Diâmetro					
6 mm			8 mm		
Pressão [bar]	Corrente [% calor]	Ensaio	Pressão [bar]	Corrente [% calor]	Ensaio
35	20	6_35_20	60	40	8_60_40
	30	6_35_30		50	8_60_50
	40	6_35_40		60	8_60_60
	50	6_35_50		70	8_60_70
	60	6_35_60		80	8_60_80
40	20	6_40_20	65	40	8_65_40
	30	6_40_30		50	8_65_50
	40	6_40_40		60	8_65_60
	50	6_40_50		70	8_65_70
	60	6_40_60		80	8_65_80
45	20	6_45_20	70	40	8_70_40
	30	6_45_30		50	8_70_50
	40	6_45_40		60	8_70_60
	50	6_45_50		70	8_70_70
	60	6_45_60		80	8_70_80
50	20	6_50_20	75	40	8_75_40
	30	6_50_30		50	8_75_50
	40	6_50_40		60	8_75_60
	50	6_50_50		70	8_75_70
	60	6_50_60		80	8_75_80
55	20	6_55_20	80	40	8_80_40
	30	6_55_30		50	8_80_50
	40	6_55_40		60	8_80_60
	50	6_55_50		70	8_80_70
	60	6_55_60		80	8_80_80

Cada ensaio foi repetido 3 vezes para garantir a repetibilidade dos resultados. Os valores utilizados correspondem à média dos valores obtidos.

O tipo de corrente utilizada é corrente alterna (CA), com frequência de 50 Hz. A duração total da soldadura é de 3500 ms, onde 1500 ms são para a descida dos eletrodos e para o aperto dos varões, 200 ms são para a descarga e os restantes 1500 ms são para o tempo de espera após a descarga e a subida dos eletrodos. A duração da descarga é de 10 ciclos.

Discussão de Resultados

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados.

Inicialmente são descritos os procedimentos da preparação dos ensaios. De seguida é feita a caracterização dos varões soldados que foram sujeitos nos valores limites do domínio das variáveis de cada um dos diâmetros. Por último são apresentados os gráficos desenvolvidos e discutidos individualmente.

4.2 Ensaio preliminares

Na primeira fase da parte experimental efetuaram-se estudos para testar o equipamento de soldadura, concluindo que este estava em bom funcionamento. Seguidamente efetuaram-se ensaios para acertar os valores das variáveis e estabelecer a região de interesse.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os ensaios realizados e a área deformada respetiva para varões de 6 mm de diâmetro. Com estes resultados pode observar-se o comportamento da soldadura para definir o domínio das variáveis do processo. Foi ainda possível constatar a influência do número de ciclos e intensidade de corrente sobre a área deformada após o processo de soldadura. Esta relação está representada na Figura 4.1.

Pode verificar-se que a área deformada é muito semelhante nos ensaios realizados, independentemente da corrente aplicada. Com o aumento do número de ciclos, a influência da intensidade da corrente torna-se mais relevante. A área deformada aumenta com o número de ciclos e com o aumento da intensidade da corrente.

Tabela 4.1 – Ensaios preliminares

d [mm]	F [kN]	I [%]	Ciclos	Área deformada (mm ²)
6	35	40	1	12.8
			3	14.91
			5	20.75
			10	26.71
		50	1	13.5
			3	18.54
			5	26.87
			10	33.95
		60	1	14.38
			3	22.6
			5	30.7
			10	40.18

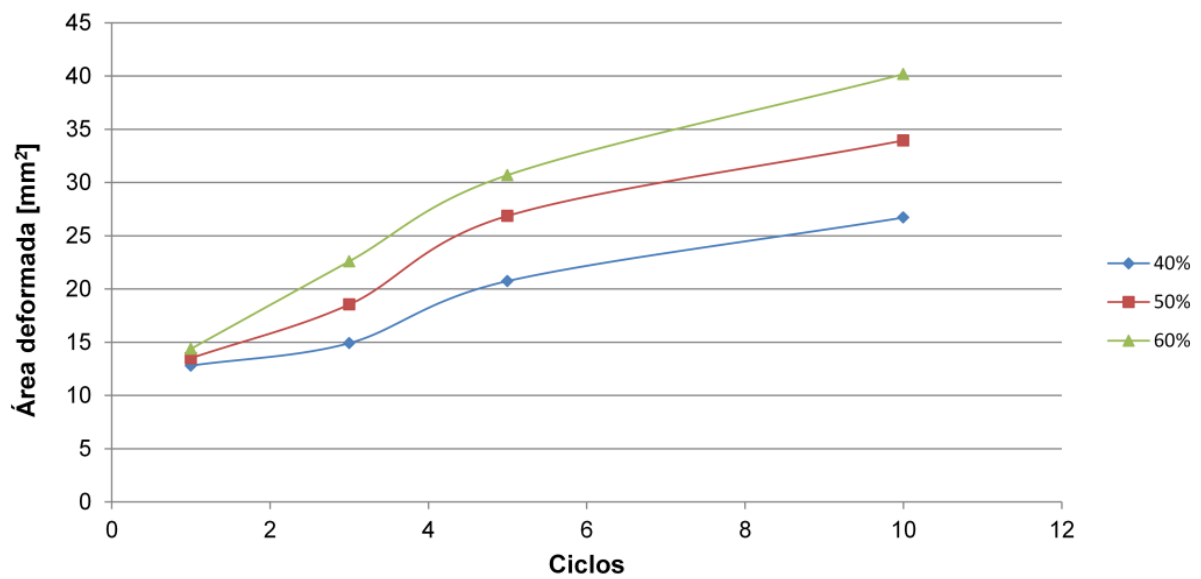


Figura 4.1 – Influência do número de ciclos e intensidade de corrente sobre a área deformada

4.3 Resultados experimentais

Os dados obtidos a partir das medições foram analisados através do *software Matlab*.

Os valores da resistência dinâmica foram obtidos através da divisão dos picos da tensão pelos picos da corrente.

Na Tabela 4.2 estão representados os valores de pico de tensão e pico de corrente de cada ciclo para o ensaio 8_60.

As restantes tabelas encontram-se no anexo A1.

Tabela 4.2 - Valores obtidos para $d = 8$ mm e $P = 60$ bar

Ciclo	$V_{20\%}$ [V]	$I_{20\%}$ [kA]	$Rd_{20\%}$ [m Ω]	$V_{30\%}$ [V]	$I_{30\%}$ [kA]	$Rd_{30\%}$ [m Ω]	$V_{40\%}$ [V]	$I_{40\%}$ [kA]	$Rd_{40\%}$ [m Ω]	$V_{50\%}$ [V]	$I_{50\%}$ [kA]	$Rd_{50\%}$ [m Ω]	$V_{60\%}$ [V]	$I_{60\%}$ [kA]	$Rd_{60\%}$ [m Ω]
1	3.49	5.45	640.59	3.62	6.27	577.76	3.90	6.92	564.00	3.49	6.84	510.53	3.59	6.86	523.34
2	3.09	5.70	542.13	3.42	6.74	507.41	3.80	7.21	527.97	3.49	8.08	432.14	3.69	8.56	430.99
3	3.69	6.35	580.97	3.62	7.24	500.41	3.90	7.52	519.49	3.69	8.43	437.62	3.49	8.68	401.75
4	3.49	6.12	569.56	3.52	6.99	503.57	3.70	7.33	505.25	3.39	8.28	409.42	3.59	8.56	419.01
5	3.59	6.94	516.85	3.52	7.13	494.04	3.80	7.27	523.17	3.49	8.28	421.50	3.49	8.79	396.63
6	3.39	6.12	553.78	3.32	6.88	482.71	3.80	7.18	529.88	3.49	8.27	422.16	3.49	8.58	406.67
7	3.39	6.19	547.33	3.42	6.98	490.61	3.90	7.34	531.59	3.49	8.25	423.18	3.59	8.98	399.60
8	3.29	6.18	532.30	3.42	6.87	498.18	3.80	7.07	538.28	3.29	8.24	399.27	3.39	8.70	389.34
9	3.29	6.20	530.58	3.32	6.73	493.54	3.80	7.25	524.54	3.49	8.35	417.86	3.39	8.68	390.23
10	3.29	6.22	528.36	3.42	6.78	504.94	3.70	7.24	511.74	3.39	8.26	410.41	3.49	8.66	402.68

Na Figura 4.2 estão representados os sinais da corrente e da tensão obtidas para o ensaio 8_60_40.

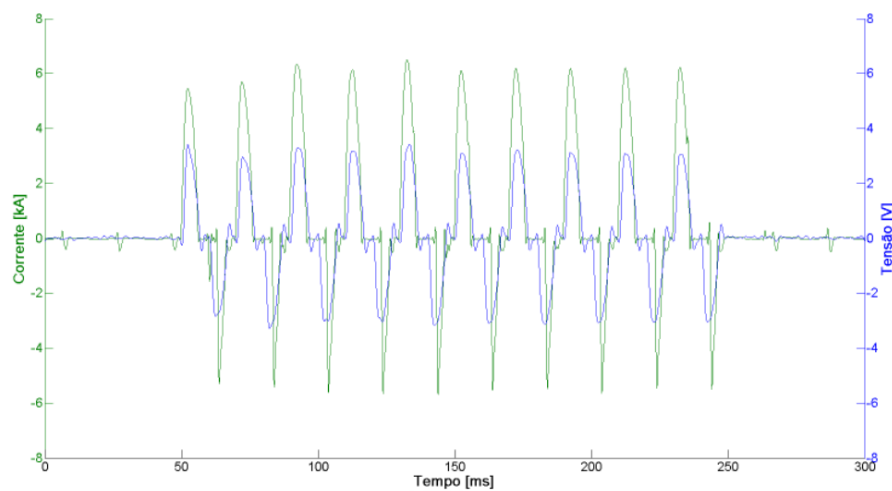


Figura 4.2 – Corrente e tensão ($d = 8$ mm; $P = 60$ bar; $\%I = 40\%$)

4.4 Resistência dinâmica

Nas Figura 4.3 a Figura 4.20 estão representados os gráficos da resistência dinâmica obtidos para os vários ensaios.

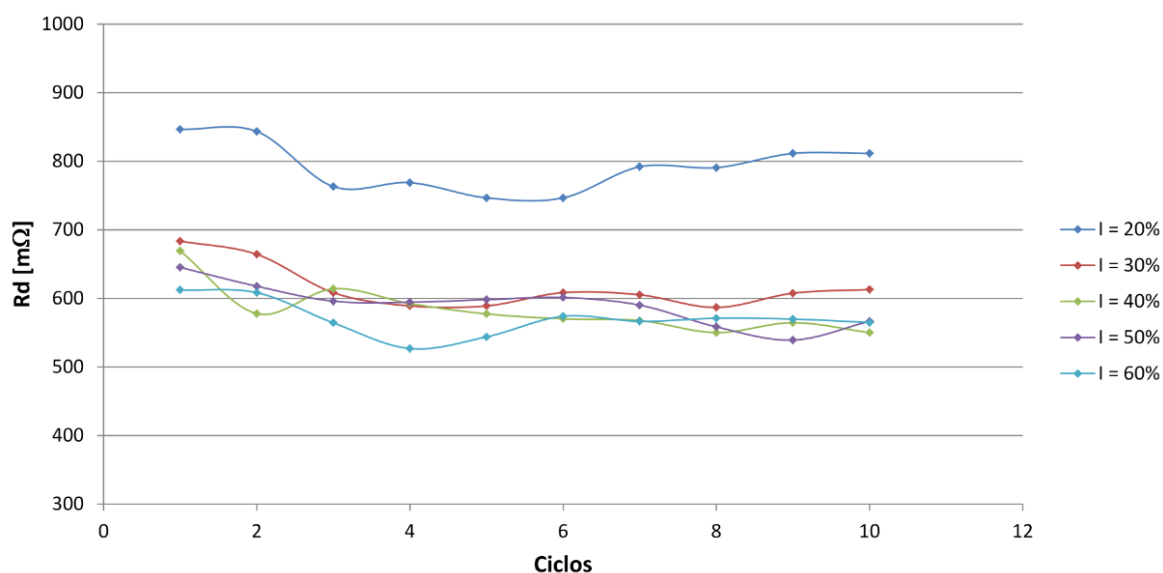


Figura 4.3 – Resistência dinâmica para o ensaio $d = 6 \text{ mm}$ e $P = 35 \text{ bar}$

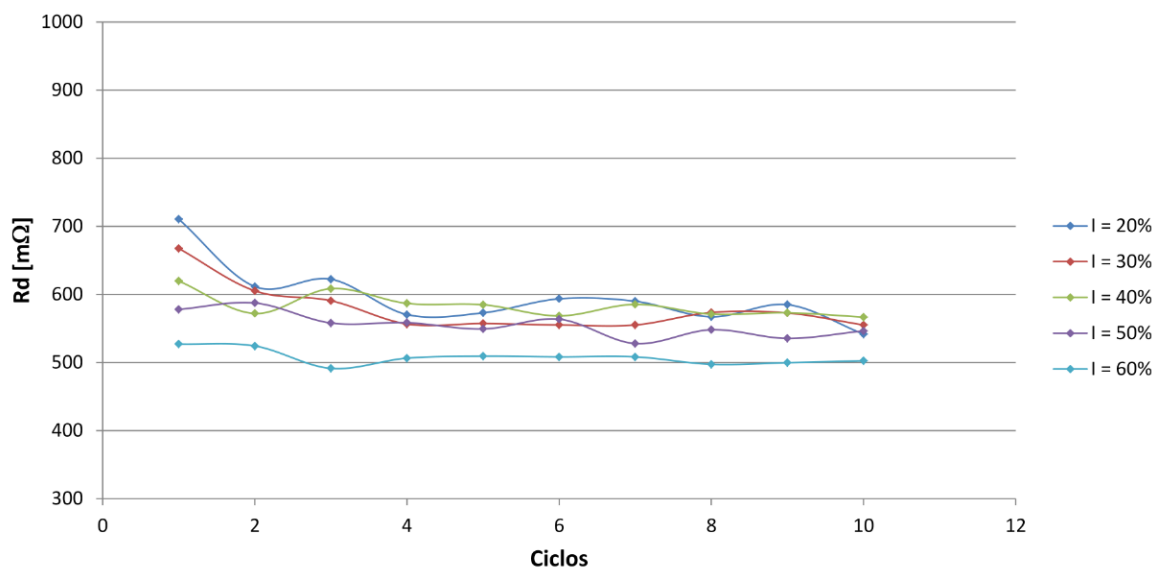


Figura 4.4 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio $d = 6 \text{ mm}$ e $P = 40 \text{ bar}$

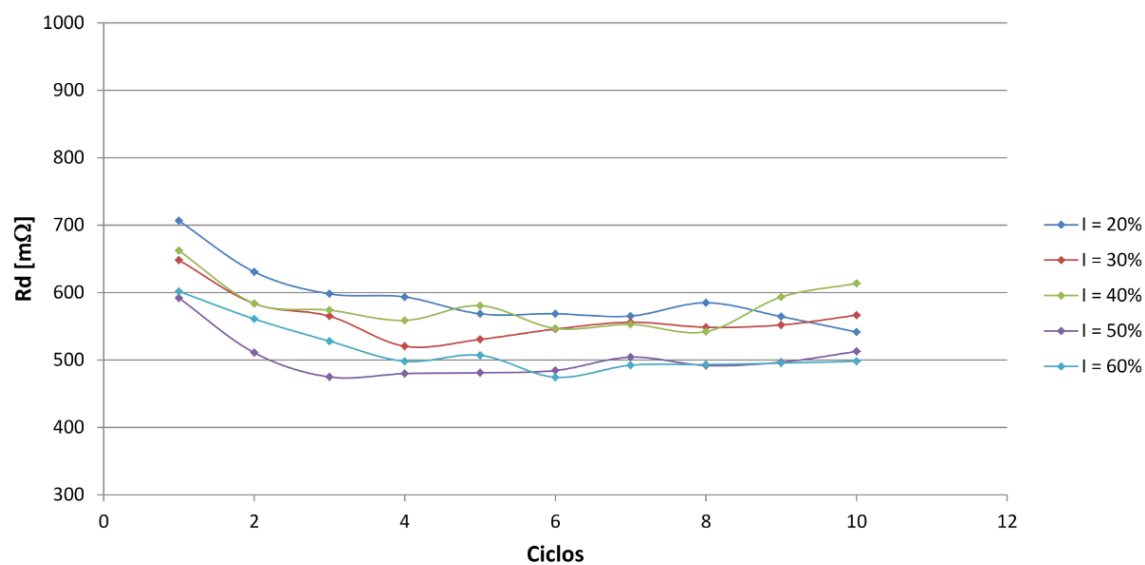


Figura 4.5 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 45 bar

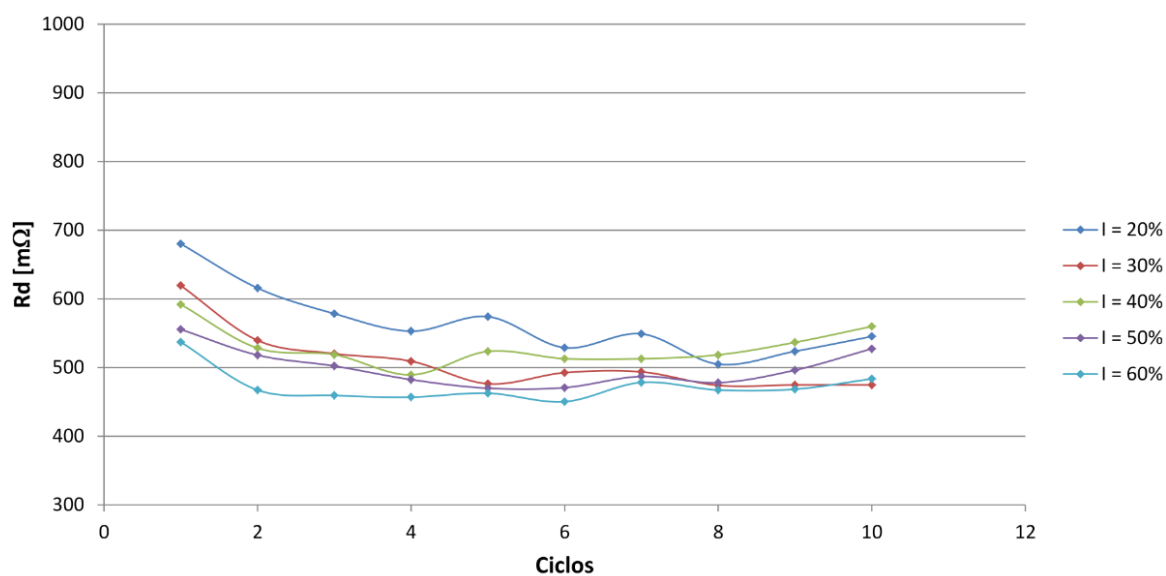


Figura 4.6 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 6 mm e P = 50 bar

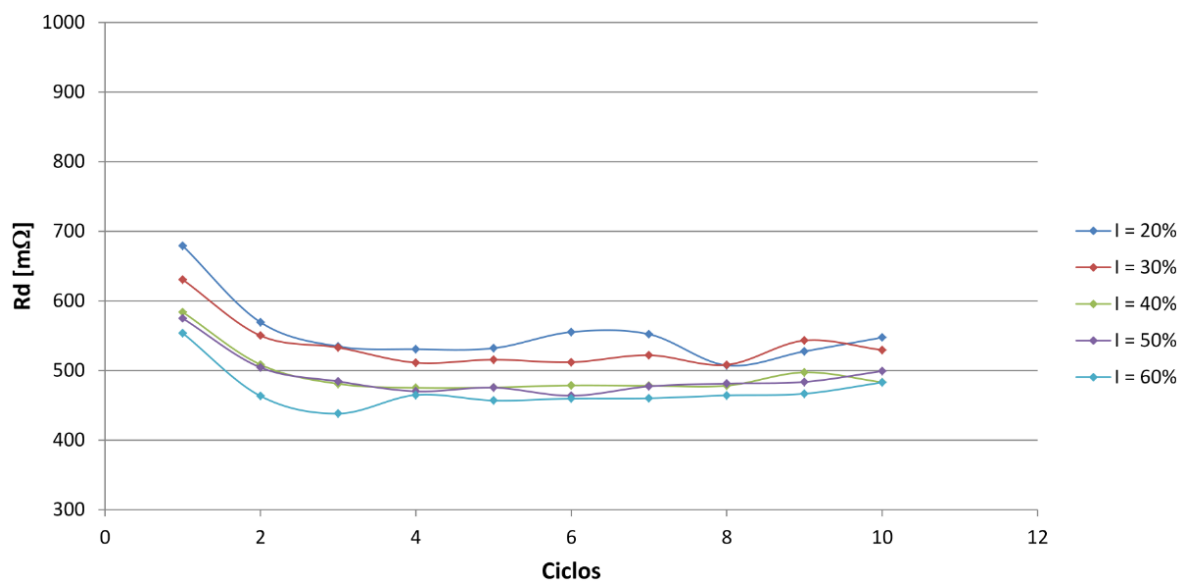


Figura 4.7 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio $d = 6$ mm e $P = 55$ bar

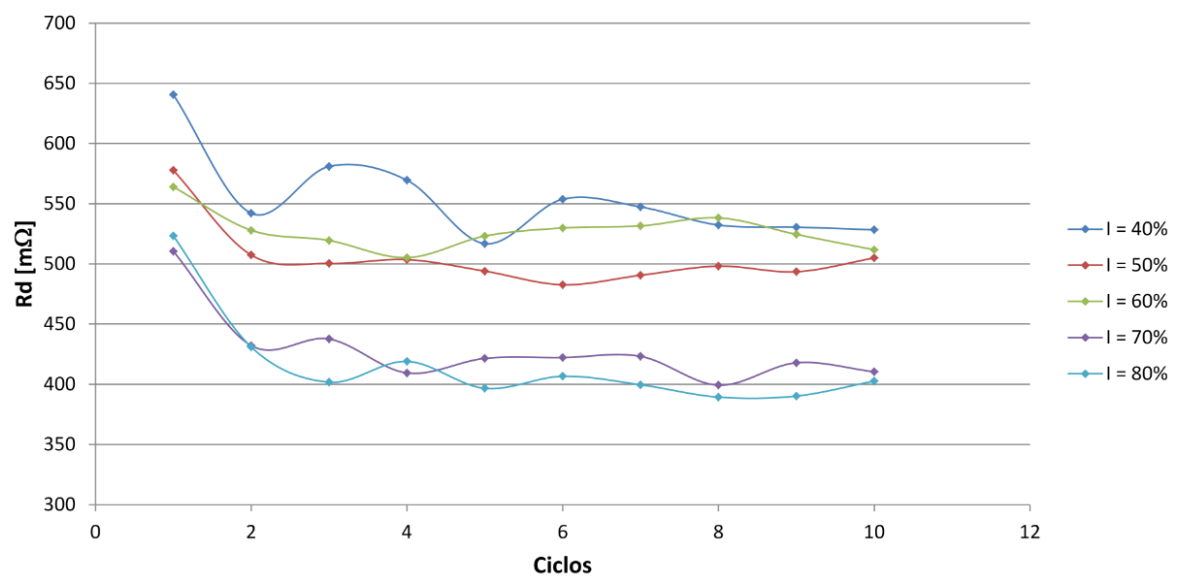


Figura 4.8 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio $d = 8$ mm e $P = 60$ bar

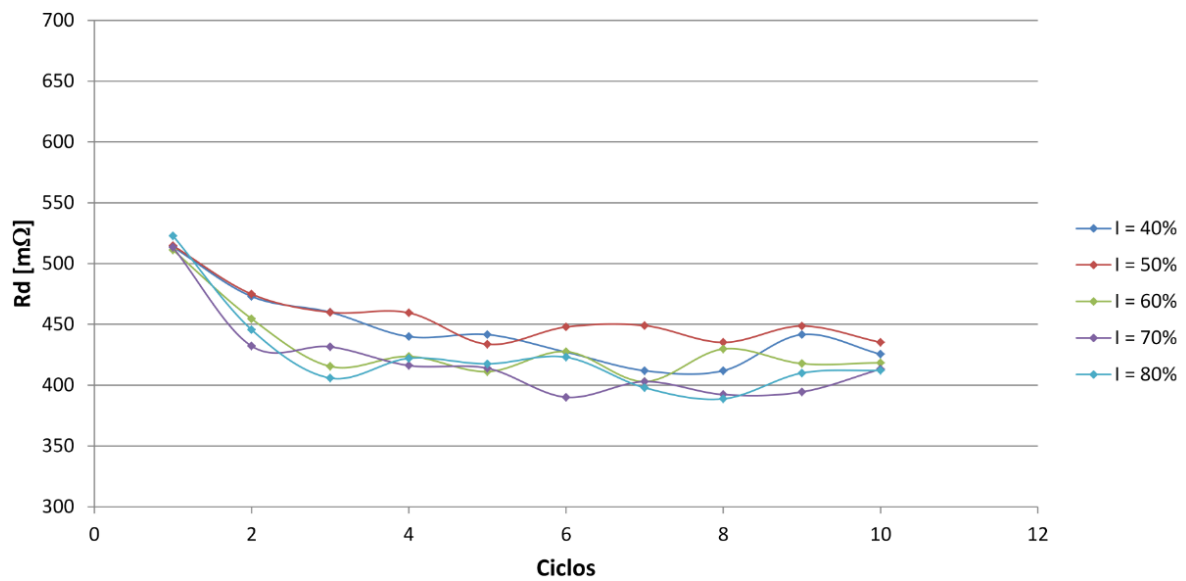


Figura 4.9 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 65 bar

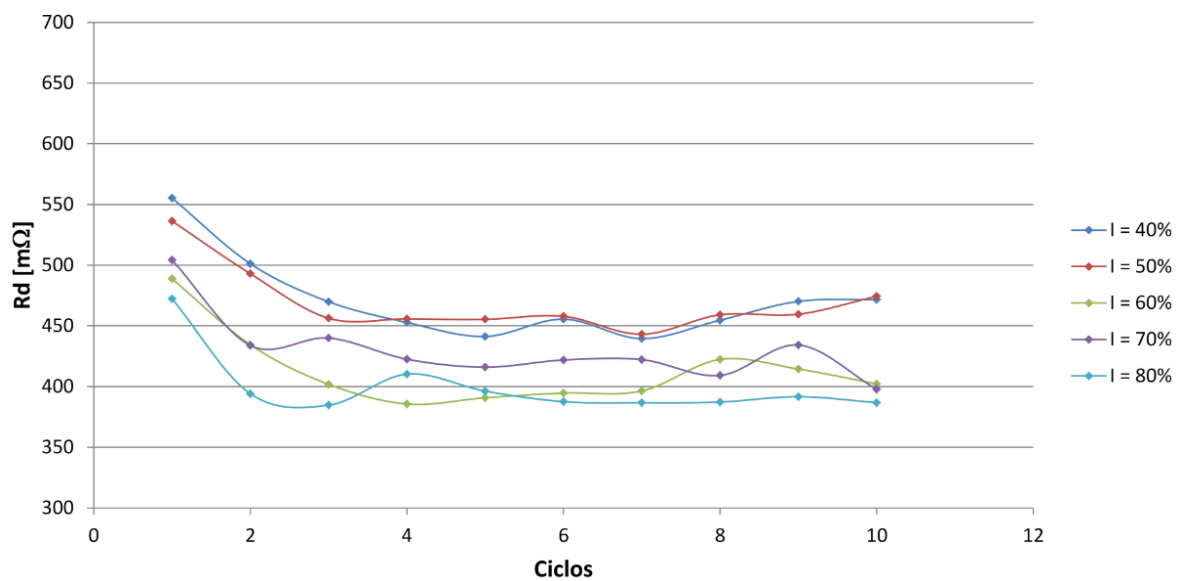


Figura 4.10 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 70 bar

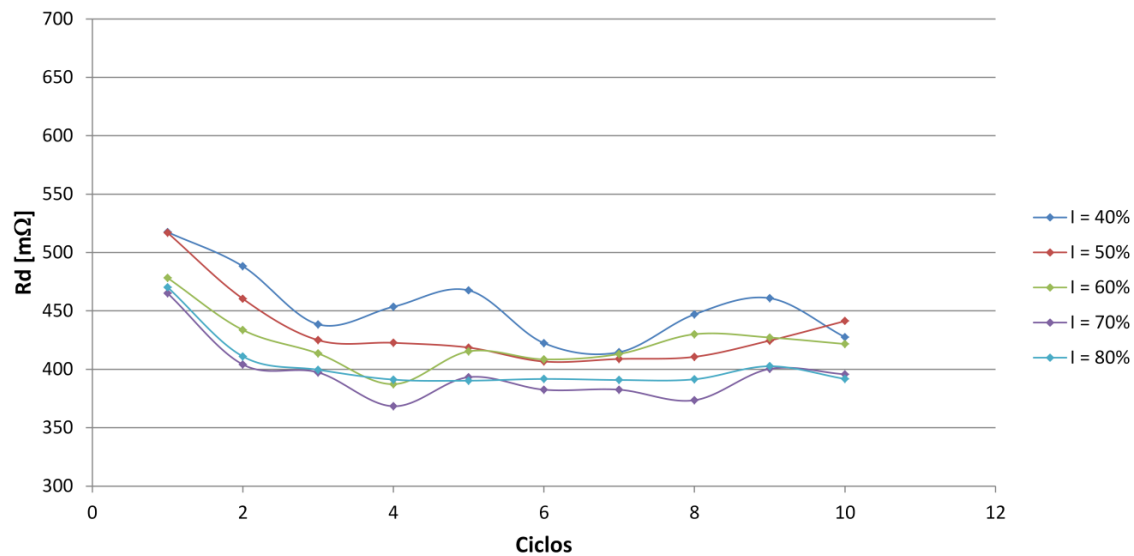


Figura 4.11 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 75 bar

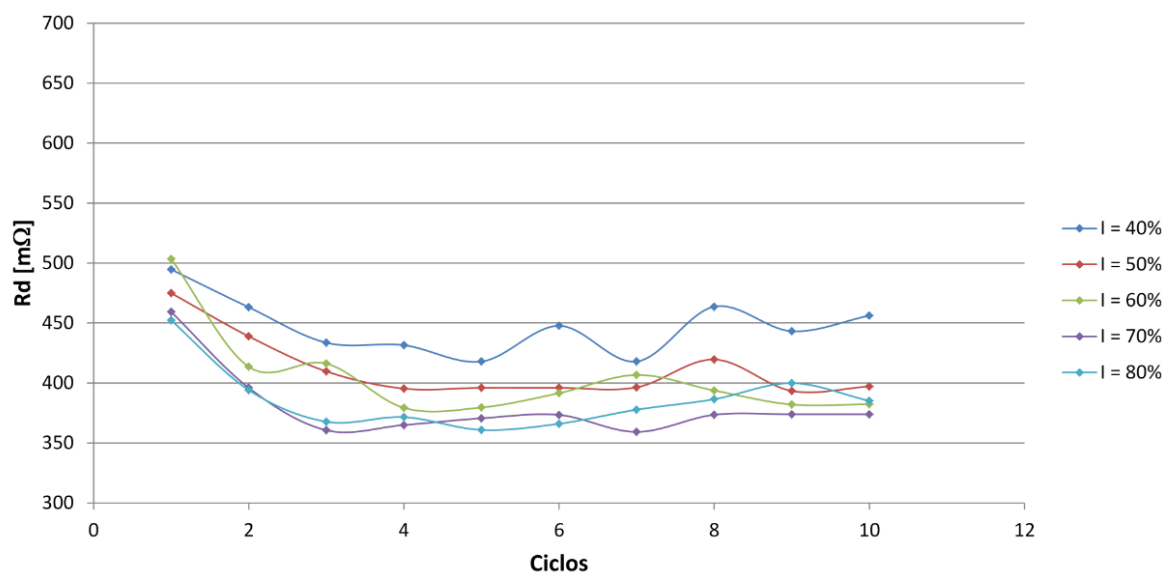


Figura 4.12 - Gráfico da resistência dinâmica para o ensaio d = 8 mm e P = 80 bar

Verifica-se que a forma da curva ao longo do tempo é diferente da curva teórica apresentada na literatura. A razão para essa diferença deverá dever-se à geometria das peças usadas na soldadura. Os estudos efetuados sobre este tema são todos realizados em chapa e neste trabalho são usados varões.

A curva de resistência dinâmica para varões tem este aspeto devido a ocorrer sempre expulsão e à deformação que existe entre a interface peça-eletrodo devido à geometria circular.

Todas as curvas apresentam um decréscimo inicial que ocorre devido à presença de rugosidades nas superfícies dos varões e da sujidade existente nas superfícies. Com o tempo, a passagem da corrente produz um aumento de temperatura na superfície que amolece as rugosidades e aumenta a área de passagem de corrente, diminuindo a resistência. Após o decréscimo inicial, é atingido um ponto mínimo, ponto α , verificado em todas as curvas. O ponto β é o ponto máximo da curva e significa que foi atingido o ponto de estabilização da temperatura.

É possível verificar que uma grande maioria das curvas apresenta dois picos. O primeiro pico deve-se provavelmente à fusão da interface dos dois varões e o segundo pico devido à fusão/deformação na interface varão/eletrodo e da expulsão.

Observa-se que quanto menor é a intensidade da corrente, maiores são os valores da resistência dinâmica.

Verifica-se que os pontos referentes à corrente de 20% no ensaio de 6 mm de diâmetro apresentam valores discrepantes em comparação com as outras percentagens de calor. A justificação encontrada é que a utilização de 20% de calor é insuficiente para uma soldadura eficaz. Esta situação já se tinha observado através da inspeção visual dos varões soldados nestas condições.

Nos gráficos da Figura 4.13 e Figura 4.15 está ilustrada a relação entre a resistência dinâmica e a variação da força e corrente. Observa-se que a curva de 20% de corrente para o diâmetro de 6 mm apresenta um ponto isolado, reforçando a ideia de que a soldadura com nestas condições não é consistente. Omitindo este ponto pode verificar-se que existe tendência similar à dos restantes ensaios (Figura 4.14)

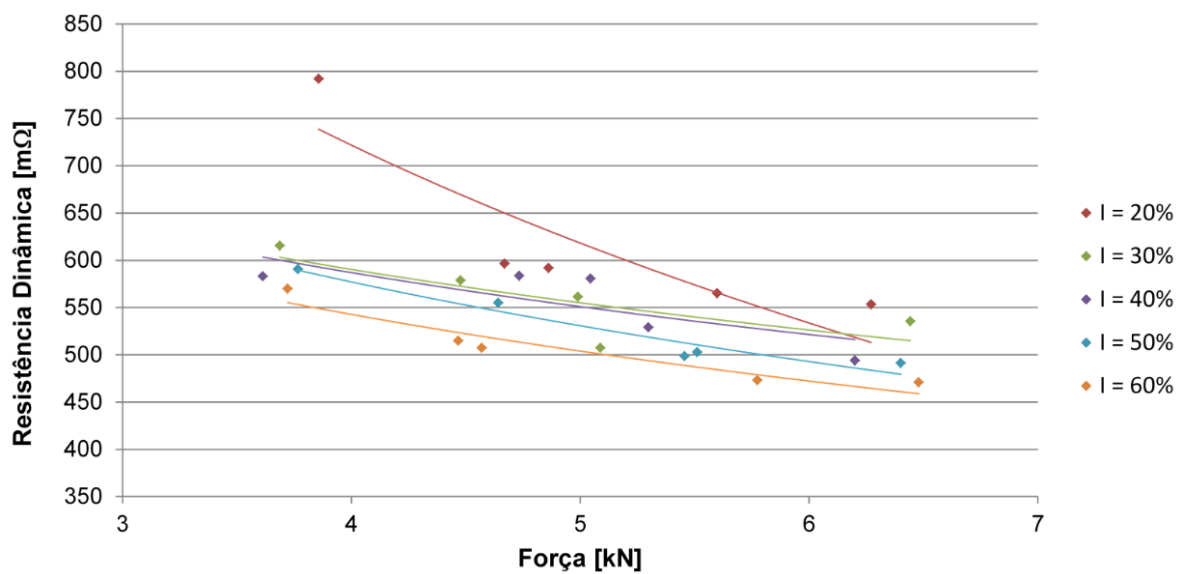


Figura 4.13 – Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica ($d = 6 \text{ mm}$)

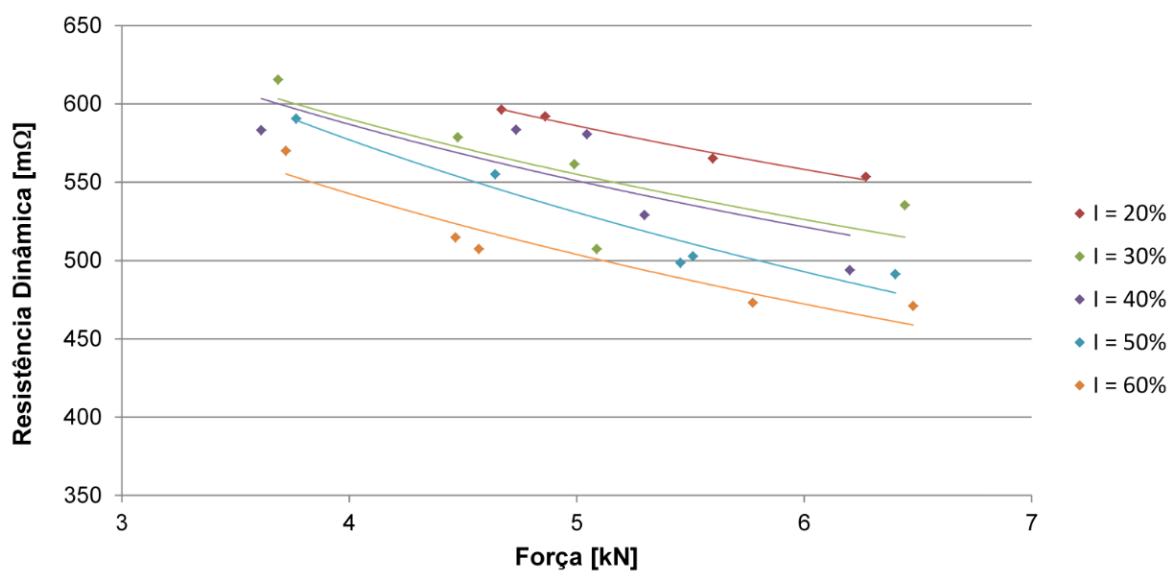


Figura 4.14 – Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica ($d = 6 \text{ mm}$) com omissão do ensaio referente a $\%I = 20\%$ e $P = 35 \text{ bar}$

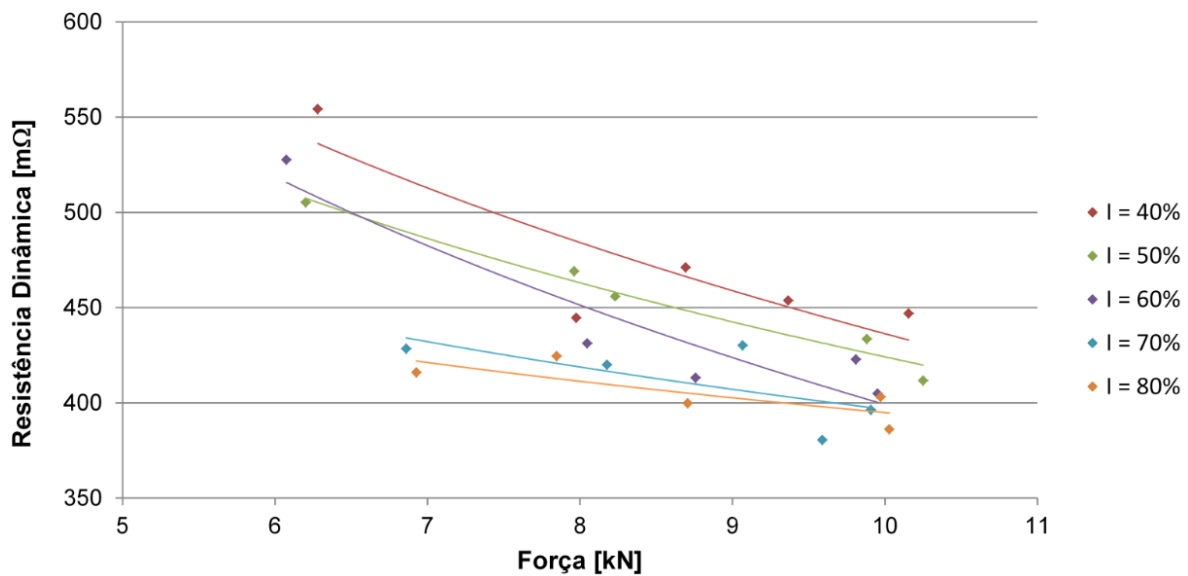


Figura 4.15 - Influência da força e corrente sobre a resistência dinâmica (d = 8 mm)

Nas Figura 4.16 e Figura 4.17 apresenta-se a representação bidimensional da correlação entre a resistência dinâmica e a força de aperto e a corrente. Pode verificar-se a influência cruzada destas duas variáveis.

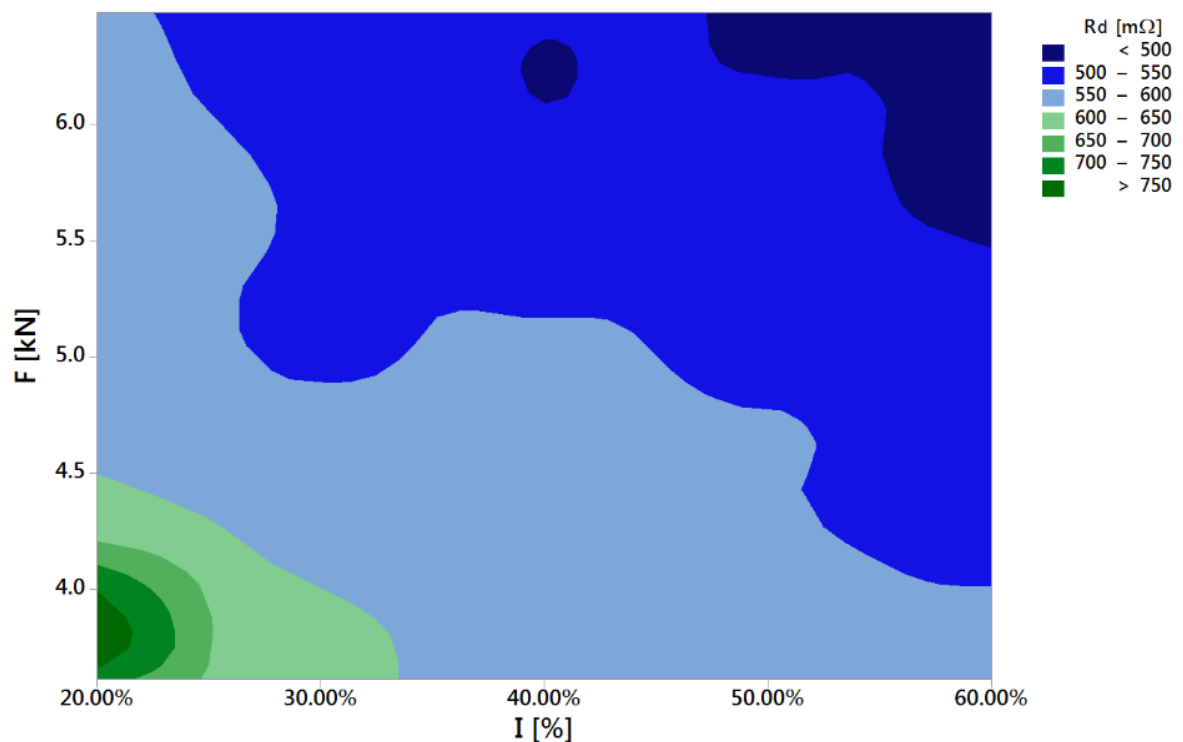


Figura 4.16 – Representação bidimensional para varão de d = 6 mm

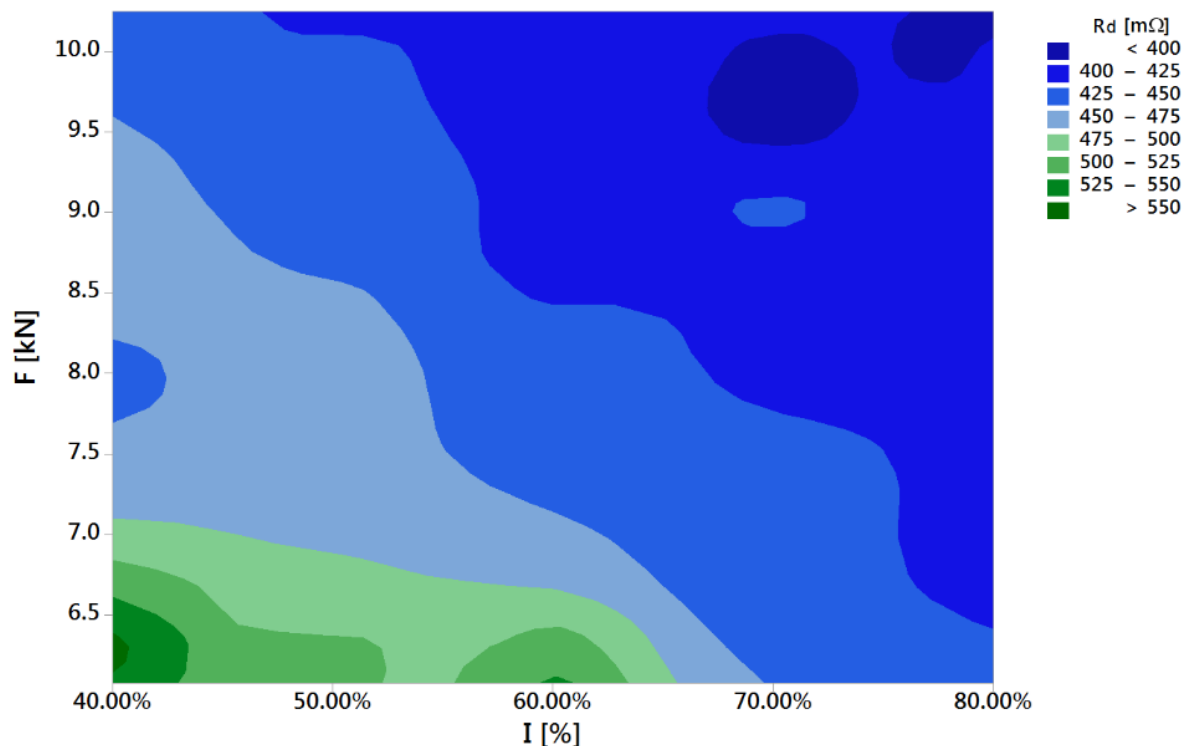


Figura 4.17 – Representação bidimensional para varão de $d = 8$ mm

Observa-se que para os ensaios de 8 mm de diâmetro os valores da resistência dinâmica são inferiores aos obtidos nos ensaios de 6 mm, o que demonstra a forte relação entre R_d e o diâmetro dos varões. A resistência dinâmica diminui com a diminuição simultânea da intensidade da corrente e da força de aperto.

4.5 Força de aperto

A pesquisa bibliográfica realizada indica que a força de aperto é muito importante, sendo responsável pela aplicação da força nas peças, pela condução da corrente elétrica e na ajuda da refrigeração da zona soldada.

Nas Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21 está representada a variação da força de aperto ao longo do processo de soldadura. Descreve-se em seguida a força dos eletrodos com base na Figura 4.18. Os eletrodos iniciam a descida e entram em contacto com os varões por volta dos 1000 ms. A partir dos 1000 ms até aos 1550 ms a curva sofre uma mudança de declive. Esta situação deve-se à deformação dos picos existentes na superfície dos varões. Aos 1550 ms inicia-se a descarga, havendo uma diminuição da força. Esta diminuição ocorre devido à passagem da corrente que aquece os varões e funde a zona de contacto entre varões. A descarga acaba aos 1750 ms e a partir desse ponto inicia-se o tempo de espera após a descarga, onde se dá a

solidificação do *nugget*. O aumento da força dos eletrodos provocada pelo arrefecimento do *nugget* deve-se à resistência inicial após a solidificação, mantendo-se posteriormente constante.

Aos 3650 ms os eletrodos iniciam a subida, e verifica-se uma variação da força que se deve à “descolagem” dos eletrodos aos varões.

A força durante a descarga varia consoante a percentagem de corrente. Quanto maior a percentagem corrente, maior será a área fundida e consequentemente a força dos eletrodos será menor.

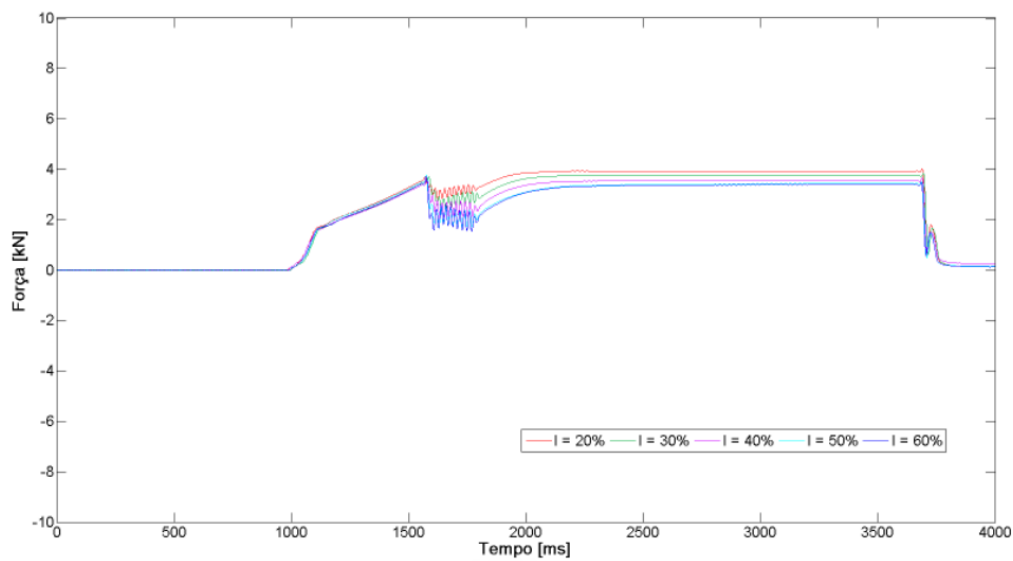


Figura 4.18 - Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 6 mm e P = 35 bar

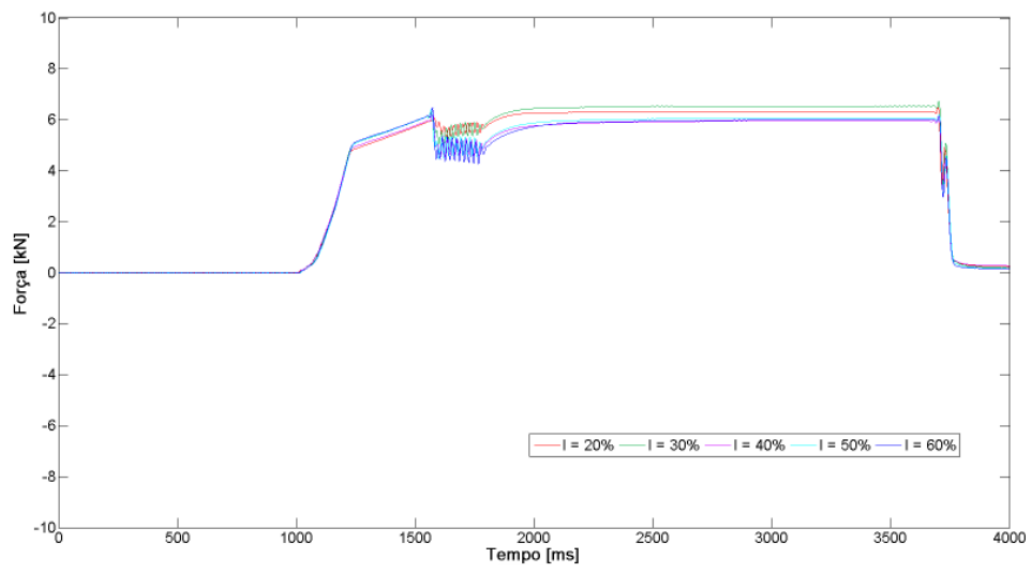


Figura 4.19 - Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de d = 6 mm e P = 55 bar

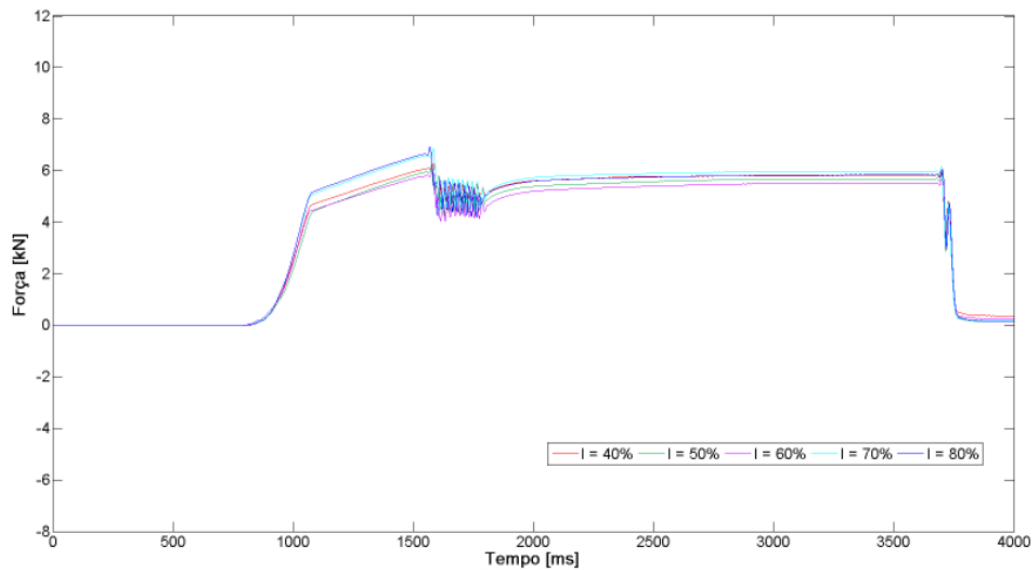


Figura 4.20- Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de $d = 8 \text{ mm}$ e $P = 60 \text{ bar}$

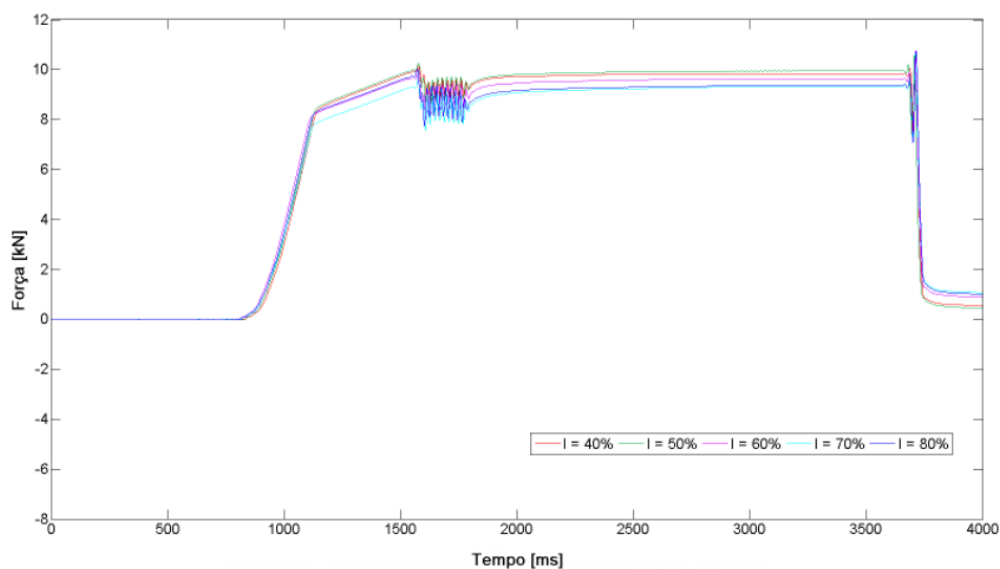


Figura 4.21- Gráfico da força dos eletrodos para o ensaio de $d = 8 \text{ mm}$ e $P = 80 \text{ bar}$

A força exercida pelos eletrodos é condicionada pela pressão aplicada. O diâmetro do varão a soldar tem grande influência na seleção do domínio de valores de força a ser aplicada, uma vez que podem ocorrer situações de pressão insuficiente que resulta numa soldadura ineficaz e pressão exagerada que pode conduzir a deformação excessiva dos varões. Os gráficos obtidos são coerentes com os encontrados na literatura.

4.6 Área deformada

Após a soldadura, procedeu-se à medição da área deformada em todos os varões.

Os valores das áreas obtidas em função da força exercida pelos eletrodos e da corrente apresentam-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valores experimentais para F, Rd e A

d [mm]	P [bar]	I [%]	F [kN]	Rd [mΩ]	A [mm ²]	d [mm]	P [bar]	I [%]	F [kN]	Rd [mΩ]	A [mm ²]
6	35	20	3.86	792.01	15.61	8	60	20	6.28	554.25	30.60
		30	3.69	615.46	19.09			30	6.20	505.32	31.97
		40	3.61	583.26	26.71			40	6.08	527.59	36.97
		50	3.77	590.64	33.95			50	6.86	428.41	43.63
		60	3.72	570.09	40.18			60	6.93	416.02	46.47
	40	20	4.67	596.44	16.13		65	20	7.98	444.62	33.12
		30	4.48	578.80	20.08			30	8.23	455.84	34.94
		40	4.73	583.57	28.75			40	8.05	431.25	41.65
		50	4.64	555.14	35.01			50	8.18	420.00	45.60
		60	4.57	507.37	40.32			60	7.85	424.56	47.77
	45	20	4.86	592.05	17.86		70	20	8.69	471.19	31.29
		30	4.99	561.50	21.76			30	7.96	469.07	35.84
		40	5.04	580.67	30.07			40	8.76	413.15	43.20
		50	5.51	502.70	37.11			50	9.07	430.19	47.12
		60	4.47	514.76	41.88			60	8.71	399.76	49.27
	50	20	5.60	565.20	18.71		75	20	9.37	453.78	32.89
		30	5.09	507.32	25.08			30	9.88	433.56	36.52
		40	5.30	529.15	31.17			40	9.81	422.86	44.07
		50	5.46	498.63	38.00			50	9.91	396.28	47.77
		60	5.77	473.01	43.70			60	9.97	403.06	52.26
	55	20	6.27	553.43	20.75		80	20	10.16	446.93	34.71
		30	6.44	535.42	27.03			30	10.25	411.73	40.10
		40	6.20	493.85	33.64			40	9.95	404.85	46.73
		50	6.40	491.31	41.88			50	9.59	380.54	50.34
		60	6.48	470.96	45.55			60	10.03	386.18	54.15

As Figura 4.22 e Figura 4.23 ilustram a tendência de variação da área deformada com o aumento da intensidade de corrente e da força de aperto. Verifica-se que a área deformada aumenta com o aumento da força e com o aumento da % de corrente.

As curvas obtidas para todos os ensaios têm um aspeto muito semelhante.

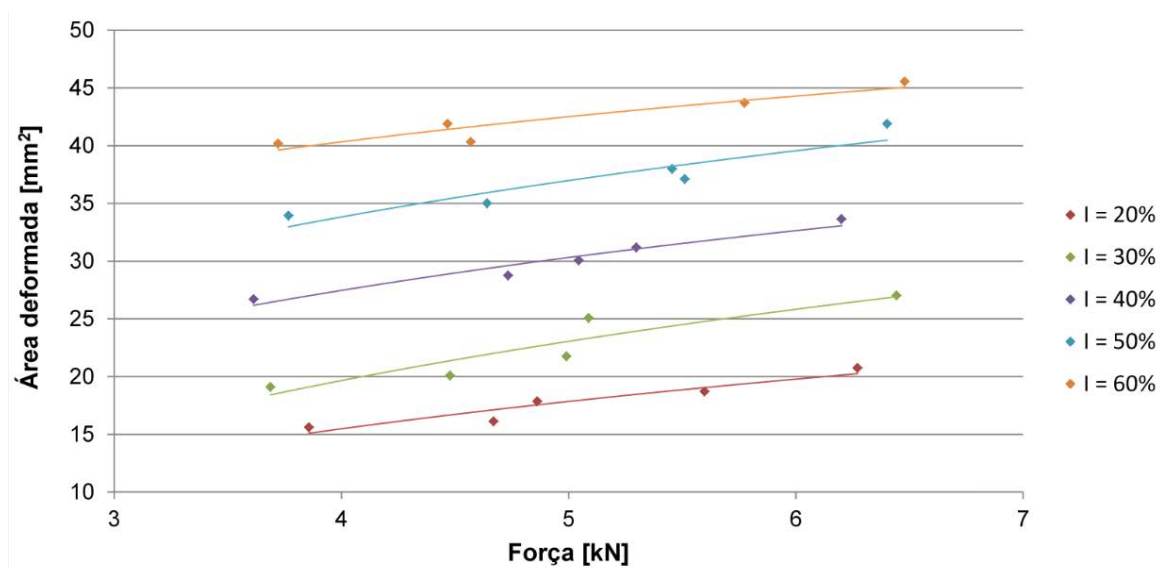


Figura 4.22 – Área deformada para varão de 6 mm de diâmetro

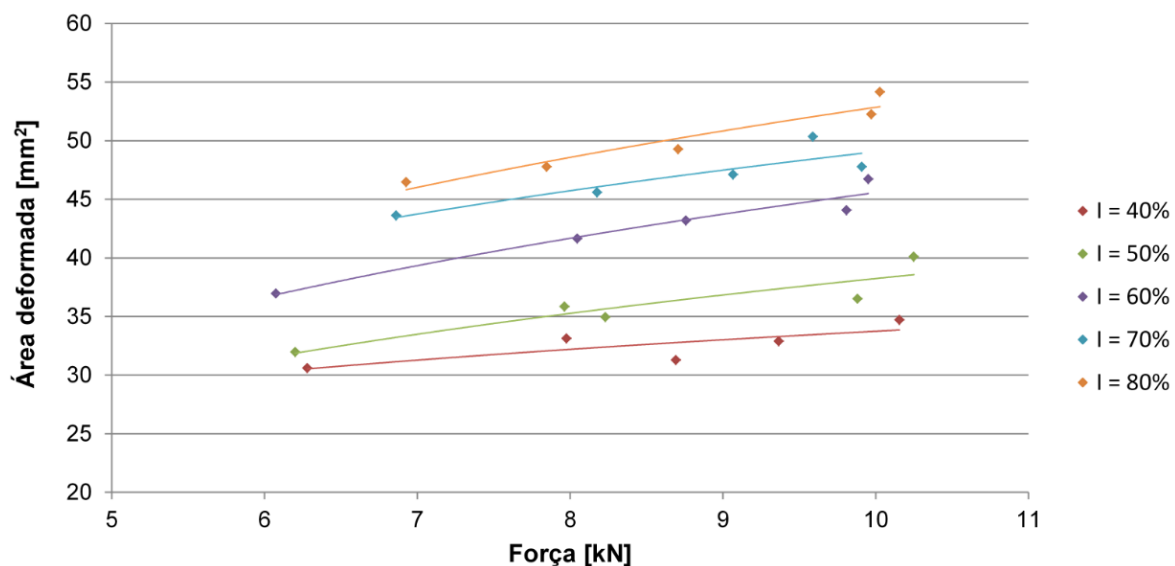


Figura 4.23 - Área deformada para varão de 8 mm de diâmetro

Na Figura 4.24 e Figura 4.25 está representada a evolução da área deformada com o aumento da pressão e da corrente. Verifica-se que a área deformada aumenta com o aumento da pressão e da corrente.

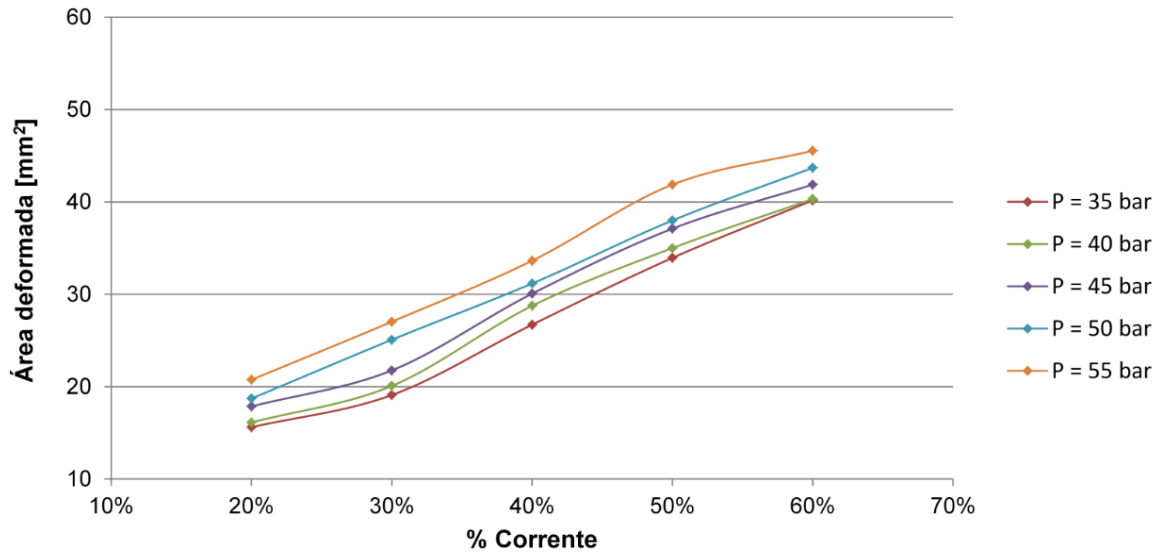


Figura 4.24 – Área deformada para varão de 6 mm de diâmetro

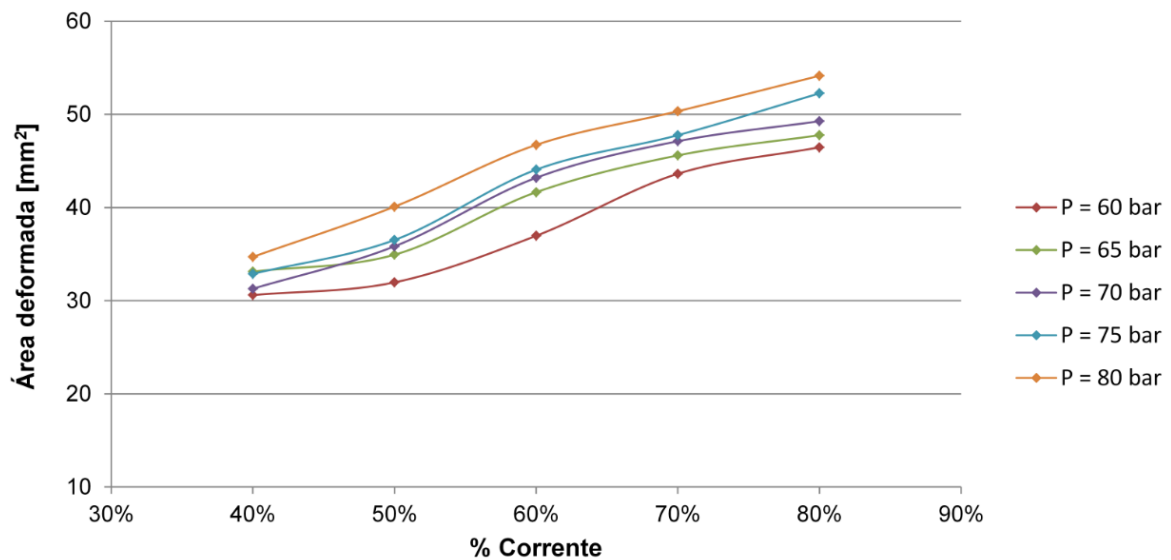


Figura 4.25 – Área deformada para varão de 8 mm de diâmetro

4.7 Caracterização estrutural

Foram realizadas 4 amostras para caracterização da zona soldada, considerando os ensaios com os valores limites das variáveis superior e inferior para cada diâmetro. Os valores das variáveis encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ensaios considerados para caracterização da zona soldada

Diâmetro					
6 mm			8 mm		
Pressão (bar)	Corrente (%)	Ensaio	Pressão (bar)	Corrente (%)	Ensaio
35	20	6_35_20	60	40	8_60_40
55	60	6_55_60	80	80	8_80_80

Na Figura 4.26 observa-se a fotomacrografia efetuada à soldadura 6_35_20. É possível identificar três zonas. A zona 1 é a zona de fusão (ZF), a 2 é a zona termicamente afetada (ZTA) e a 3 é o material de base.

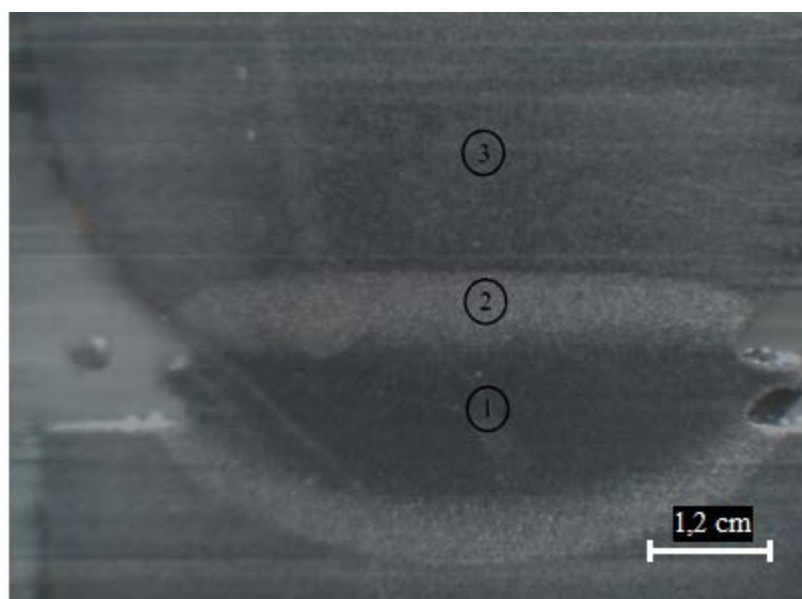
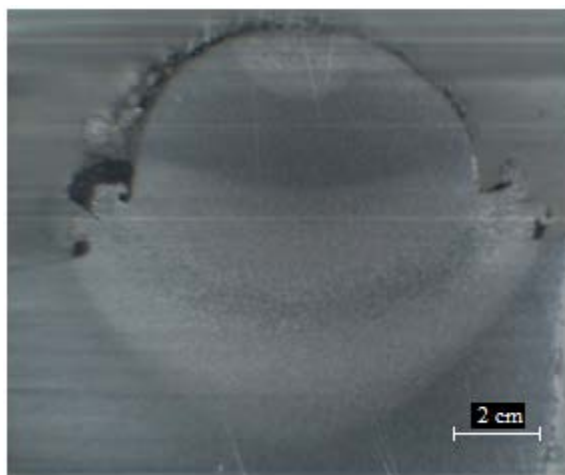
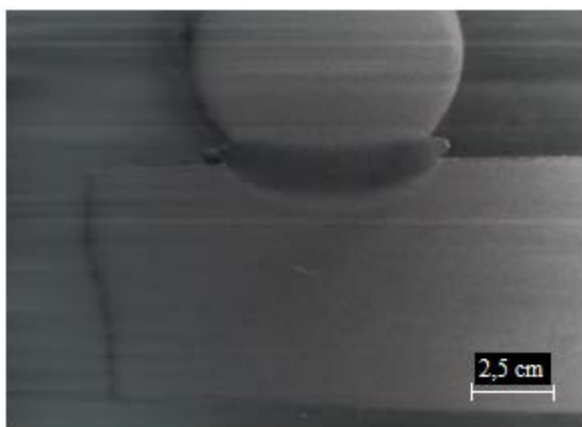


Figura 4.26 – Fotomacrografia (Ensaio 6_35_20)

Na Figura 4.27 estão representadas as restantes fotomacrografias. Observa-se que quanto maior a corrente e a força, maior é a ZTA. A soldadura 6_55_60 apresenta uma ZTA na zona de contacto entre o varão superior e o eletrodo (Figura 4.27 a). Esta situação ocorre devido à passagem de alta intensidade de corrente no varão com um diâmetro pequeno e sujeito a uma pressão elevada por parte dos eletrodos.



a)



b)



c)

Figura 4.27 – Fotomacrografia: a) ensaio 6_55_60 b) ensaio 8_60_40 c) ensaio 8_80_80

Utilizando o microscópio ótico analisou-se cada uma das zonas descritas anteriormente. As estruturas das zonas de soldadura dos dois diâmetros não apresentaram grandes diferenças, pelo que são apresentadas as estruturas referentes ao ensaio 8_80_80.

Na Figura 4.28 está representada a fotomicrografia do material de base, construído por perlite e ferrite. Na Figura 4.29 está a fotomicrografia referente à zona de transição do material de base para a zona termicamente afetada e na Figura 4.30 está a fotomicrografia da ZTA. Nesta última figura é possível verificar a existência de precipitados, que poderão ser nitratos ou precipitados de cobre devido à quantidade de azoto e cobre presentes na composição do material de base. Na Figura 4.31 está a apresentada a fotomicrografia da zona de transição da ZTA para a ZF e na Figura 4.32 é referente à fotomicrografia da ZF. A ZF é constituída por bainite inferior.

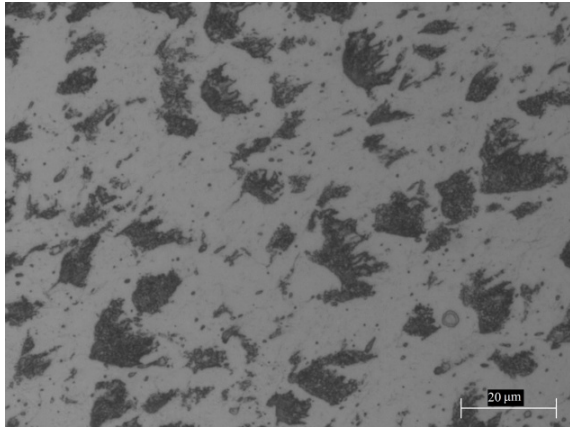


Figura 4.28 – Fotomicrografia do material de base

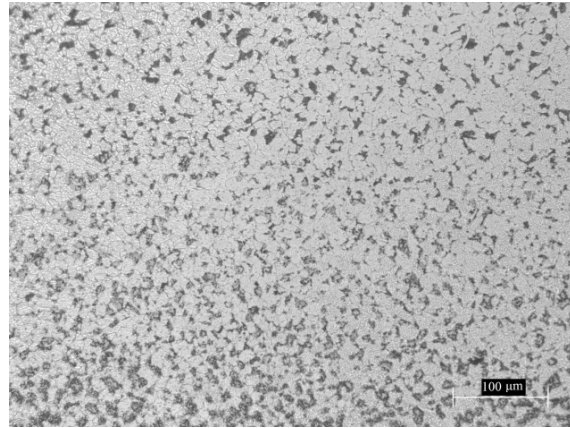


Figura 4.29 – Fotomicrografia da zona de transição do material de base para a ZTA

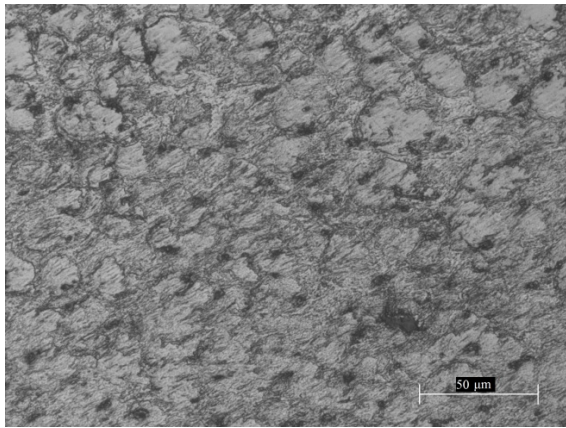


Figura 4.30 - Fotomicrografia da ZTA

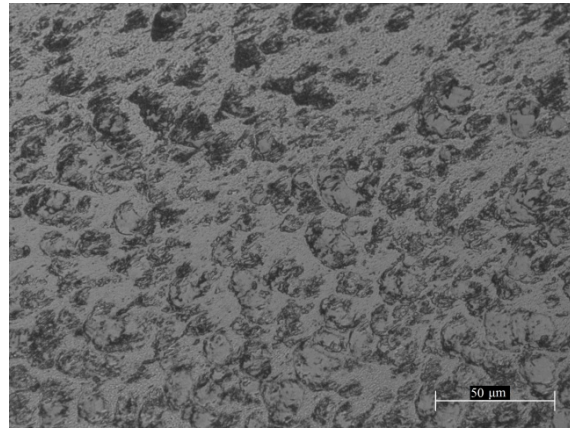


Figura 4.31 – Fotomicrografia da zona de transição entre a ZTA e ZF

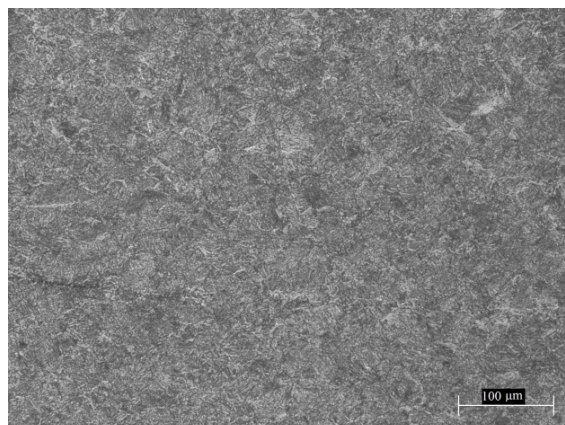


Figura 4.32 – Fotomicrografia da zona fundida

Verificou-se a existência de refinamento de grão na ZTA à medida que se ia aproximando da ZF.

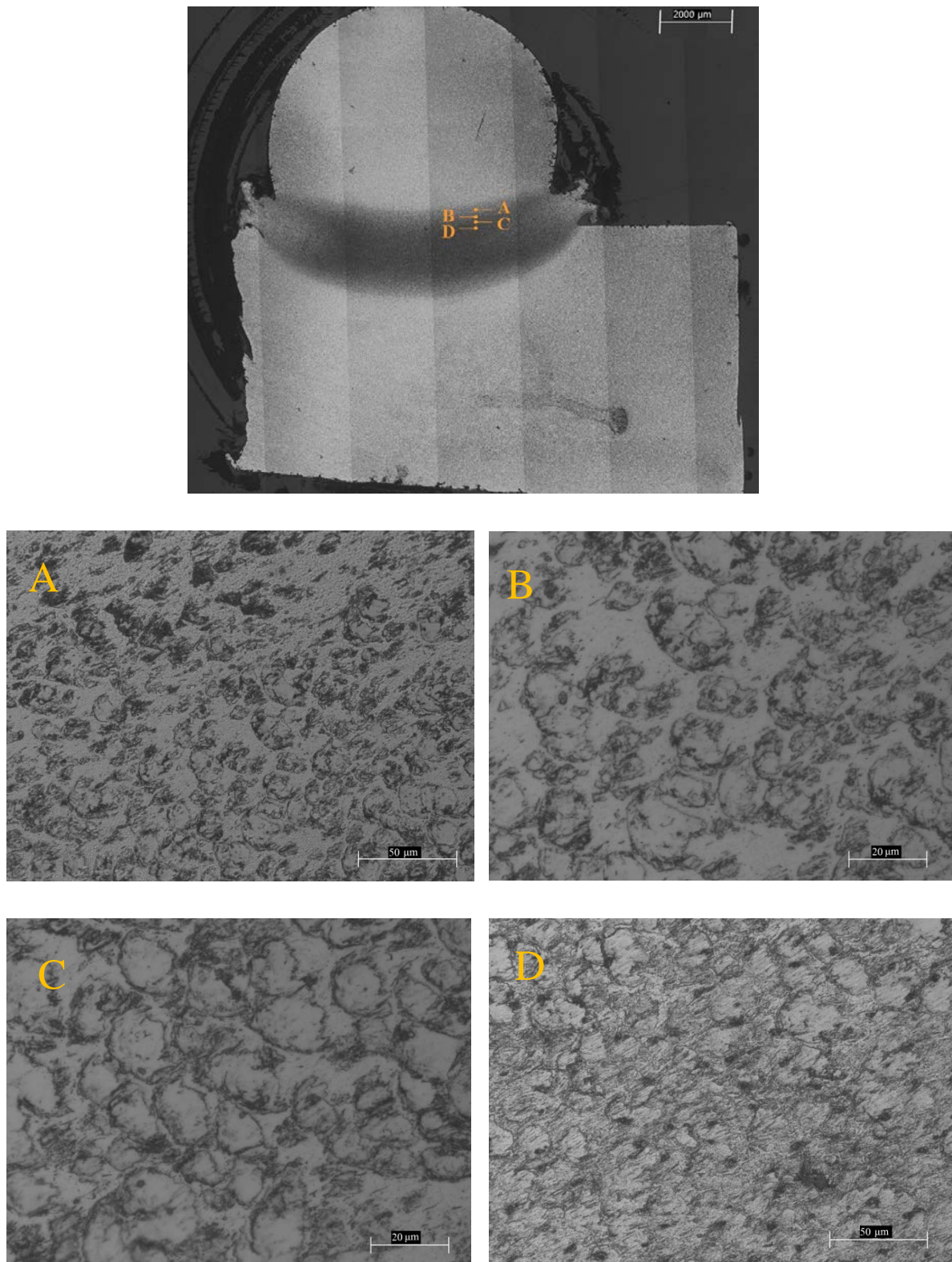


Figura 4.33 – Localização da análise do refinamento de grão

Efetuuou-se ainda uma análise da microdureza ao ensaio 8_80_80, com uma carga aplicada de 0,3 Kgf -> 2,94 N obtendo-se os valores demonstrados na Figura 4.34.

Verifica-se que a dureza no material de base apresenta os valores mais baixos, estando entre os 220-240 HV. Na ZTA os valores variam de 237-317 HV e na ZF os valores são entre 305-383 HV. A zona de expulsão mostra valores entre 305-373 HV.

Como seria de esperar, os valores da dureza aumentam consoante a proximidade à ZF sendo essa zona a que apresenta valores mais elevados.

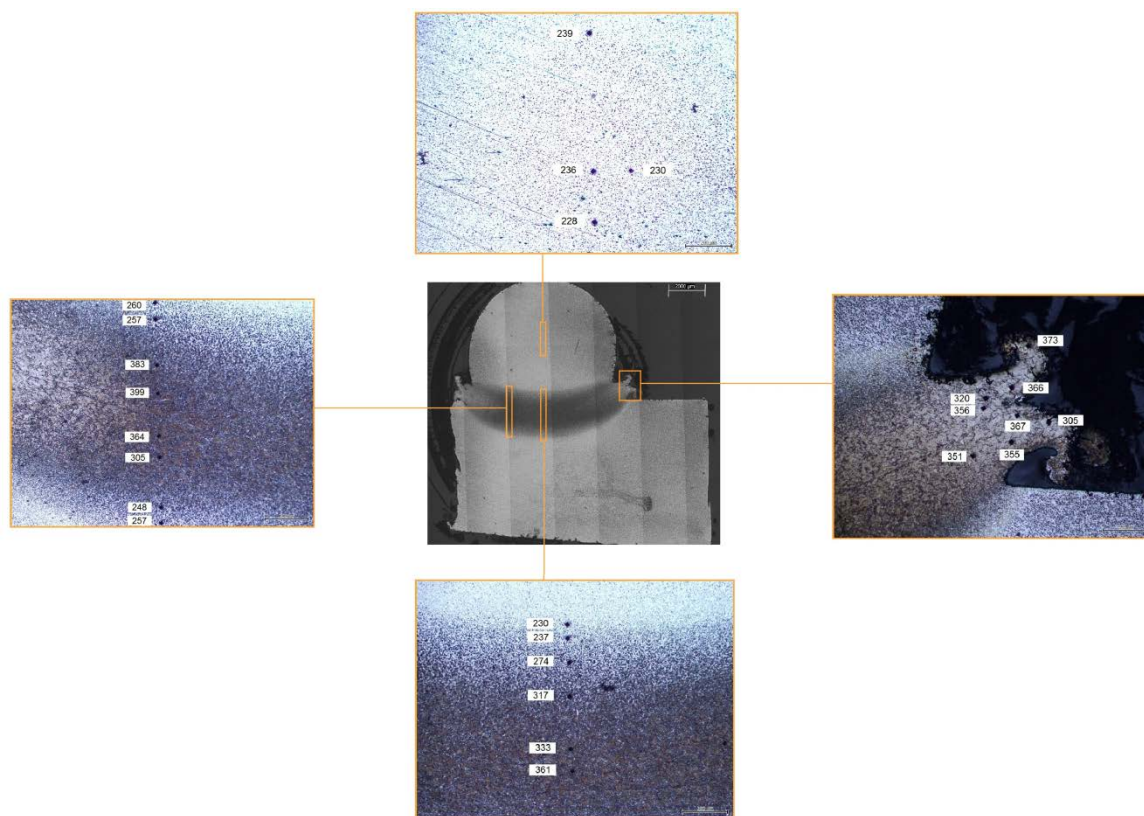


Figura 4.34 – Análise de microdureza

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Conclusões e contribuição

Esta dissertação teve como objetivo a medição e análise da resistência dinâmica em função da força de aperto. Foram considerados várias forças e várias intensidades de correntes para se poder fazer uma comparação entre as variáveis e os resultados obtidos. Foi também estudada a variação da área de fusão em função da intensidade da corrente.

Numa primeira foi feita uma revisão da literatura sobre o processo de soldadura por resistência por pontos. Concluiu-se que existe um grande número de estudos deste processo de soldadura em chapas mas que é praticamente inexistente em varões.

A análise dos resultados experimentais obtidos permitiu um melhor conhecimento da resistência dinâmica em varões.

As principais conclusões obtidas neste estudo foram:

- ⇒ O ensaio do varão de 6 mm, de pressão 35 bar e 20% de corrente apresenta uma soldadura insuficiente. Os valores obtidos para este ensaio diferem dos valores encontrados para os outros ensaios.
- ⇒ A resistência dinâmica tem uma variação inversa com a força e com a corrente. Quanto maior é a força de aplicação dos eletrodos e a corrente, menor é a resistência dinâmica ao longo do processo.
- ⇒ A área deformada entre varões aumenta com o aumento da intensidade da corrente, com o aumento da força e com o aumento do número de ciclos. Quanto maior a área deformada, menor é o valor da resistência dinâmica.

- ⇒ Verificou-se presença de precipitados na ZTA e ZF que poderão ser nitratos ou precipitados de cobre provenientes da existência de quantidades significativas de azoto e cobre no material de base.
- ⇒ Verificou-se a existência de quatro áreas distintas na ZTA.

A principal contribuição resultante deste trabalho prende-se com a geometria e o material utilizado. Ao ser realizada a caracterização da resistência dinâmica em varões de A500EL, torna-se possível dar um contributo para a melhoria da eficiência do processo de soldadura por resistência por pontos na produção das redes eletrossoldadas. Em termos científicos, contribuiu-se por se ter realizado o estudo em varões, geometria que não se encontra habitualmente na literatura.

5.2 Sugestão para trabalhos futuros

No decorrer deste trabalho foram identificados alguns aspetos que podem melhorar a qualidade dos resultados, nomeadamente:

- ⇒ Analisar e quantificar a influência do desgaste dos eletrodos ao longo das várias soldaduras.
- ⇒ Efetuar variações da corrente ao longo do processo de soldadura, como pré-aquecimento, pós aquecimento ou corrente progressiva e comparar com os resultados de corrente constante obtidos neste trabalho.
- ⇒ Efetuar uma análise mais detalhada da micrografia da ZTA

Referências Bibliográficas

- [1] P. V. Marques, P. J. Modenesi, and A. Q. Bracarense, Soldagem : fundamentos e tecnologia, 2^a ed. rev. e ampliada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- [2] M. J. Greitmann, “Welding through the Ages.” [Online]. Available: http://www.aws.org/rwma/docs/2013spr_Welding-History-AWS-2013-Greitmann.pdf. [Accessed: 14-Sep-2014].
- [3] J. F. O. Santos, Processos de soldadura. Oeiras: Instituto de Soldadura e Qualidade, 1998.
- [4] N. T. Pinto, “Influência dos parâmetros de soldadura por resistência na qualidade da soldadura de rede electrossoldada em aço A500 NRSD,” FCT-UNL, Monte da Caparica, 2011.
- [5] T. C. Joaquim, “Caracterização mecânica de redes electrossoldadas em Aço A500NR SD por resistência,” FCT-UNL, Monte da Caparica, 2011.
- [6] A. I. H. Committee and D. L. Olson, ASM handbook: Welding, brazing, and soldering. ASM International, 1993.
- [7] M. Yanhua, W. Pei, X. Chuanzhong, Z. Yongang, and H. Su, “Review on techniques for on-line monitoring of resistance spot welding process,” Advances in Materials Science and Engineering, 2013.
- [8] J. C. Dutra, T. F. Santos, R. G. Junior, M. A. Oliveira, V. V. Díaz, and C. B. Medeiros, “Desarrollo de um Sistema de Monitoreo de la Resistencia Dinámica y la Fuerza en la Soldadura a Punto por Resistencia Eléctrica,” Revista Innovación, Antofagasta - Chile, pp. 27–35, 2006.
- [9] A. W. Society, Welding Handbook. Volume 3. Welding Processes, Part 2., 9th edition. American Welding Society, 2007.
- [10] P. Podržaj, I. Polajnar, J. Diaci, and Z. Kariž, “Overview of resistance spot welding control,” Science and Technology of Welding and Joining, vol. 13, no. 3, pp. 215–224, Apr. 2008.
- [11] RWMA, Resistance Welding Manufacturing Alliance (RWMA), 4th ed. American Welding Society, 2003.
- [12] H. Zhang and J. Senkara, Resistance Welding: Fundamentals and Applications. CRC Press, 2005.
- [13] S. C. Wang and P. S. Wei, “Modeling Dynamic Electrical Resistance During Resistance Spot Welding,” J. Heat Transfer, vol. 123, no. 3, pp. 576–585, 2000.
- [14] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya, “Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring,” Welding Journal, vol. 59, pp. 170–176, 1980.
- [15] W. F. Savage, E. F. Nippes, and F. A. Wassell, “Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds,” Welding Journal, vol. 57, pp. 43–50, 1978.
- [16] Brush Wellman Inc., “The Importance of Contact Force,” Brush Wellman Inc., no. 6, Jul. 2009.
- [17] S. A. Gedeon, C. D. Sorensen, K. T. Ulrich, and T. W. Eagar, “Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds,” Welding Journal, vol. 66, pp. 378–385, 1987.

- [18] Y. Cho and S. Rhee, "New technology for measuring dynamic resistance and estimating strength in resistance spot welding," *Measurement Science and Technology*, vol. 11, no. 8, pp. 1173–1178, Aug. 2000.
- [19] Y. Cho and S. Rhee, "Primary circuit dynamic resistance monitoring and its application to quality estimation during resistance spot welding," *Welding Journal*, vol. 81, pp. 40–43, 2002.
- [20] S.-F. Ling, L.-X. Wan, Y.-R. Wong, and D.-N. Li, "Input electrical impedance as quality monitoring signature for characterizing resistance spot welding," *NDT & E International*, vol. 43, no. 3, pp. 200–205, 2010.
- [21] L. I. Ru-xiong, "Quality monitoring of resistance spot welding based on process parameters," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 925–930, 2012.
- [22] Z. Hou, I.-S. Kim, Y. Wang, C. Li, and C. Chen, "Finite element analysis for the mechanical features of resistance spot welding process," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1–3, pp. 160–165, Apr. 2007.
- [23] H. Wang, Y. Zhang, and G. Chen, "Resistance spot welding processing monitoring based on electrode displacement curve using moving range chart," *Measurement*, vol. 42, no. 7, pp. 1032–1038, Aug. 2009.
- [24] Bosch, "BOS-5000 Operating and Programming Manual, volume 1." .
- [25] W. F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3rd ed. Lisboa: Mcgraw Hill, 1998.
- [26] C. L. Ruas and J. Serrão, "Redes Electrossoldadas para Betão Armado." ATP.
- [27] S. . Codimetal Industries, "Soluções à medida das necessidades do seu negócio." .
- [28] LNEC, "Fios Lisos de Aço A500EL: Campo de Aplicações, Características e Ensaios." Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008.
- [29] J. Appleton, *Estruturas de Betão*, 1º ed., vol. 1. Amadora: Orion, 2013.
- [30] D. A. Ward and J. L. T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements," *Engineering Science and Education Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 105–113, Jun. 1993.

Anexo A

Anexo A1. Tabelas dos resultados de Rd

Valores obtidos para d = 6 mm e P = 35 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.21	3.80	846.46	3.14	4.59	683.52	3.56	5.31	669.30	3.73	5.78	645.19	3.75	6.12	612.29
2	3.41	4.05	843.38	3.24	4.87	664.20	3.26	5.64	577.71	3.73	6.03	617.71	3.95	6.49	608.29
3	3.31	4.34	763.07	3.24	5.32	608.27	3.76	6.12	613.93	3.83	6.42	595.86	3.95	6.99	564.20
4	3.31	4.31	768.73	3.04	5.16	588.94	3.46	5.83	592.39	3.73	6.27	594.35	3.65	6.92	526.73
5	3.21	4.31	746.57	3.04	5.16	588.94	3.36	5.81	577.23	3.73	6.23	598.07	3.75	6.89	543.77
6	3.21	4.31	746.57	3.14	5.16	608.34	3.36	5.89	570.07	3.73	6.20	601.26	3.95	6.88	573.88
7	3.41	4.31	791.93	3.14	5.18	605.17	3.36	5.91	567.56	3.73	6.32	590.02	3.85	6.79	566.42
8	3.41	4.32	790.64	3.04	5.18	586.67	3.26	5.92	550.00	3.53	6.32	558.35	3.85	6.74	570.88
9	3.51	4.33	811.36	3.14	5.16	607.52	3.36	5.95	564.41	3.43	6.36	539.10	3.85	6.75	569.69
10	3.51	4.33	811.36	3.14	5.12	612.98	3.26	5.92	550.00	3.63	6.40	566.47	3.85	6.81	564.76

Valores obtidos para d = 6 mm e P = 40 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	2.76	3.89	710.54	3.12	4.67	667.52	3.35	5.41	619.68	3.44	5.96	577.85	3.41	6.47	526.98
2	2.56	4.19	611.50	3.02	4.99	605.21	3.25	5.68	571.88	3.74	6.38	587.29	3.71	7.07	524.17
3	2.86	4.60	622.34	3.22	5.45	590.61	3.65	6.00	608.43	3.74	6.71	557.89	3.61	7.34	491.29
4	2.56	4.50	570.28	2.92	5.25	556.40	3.45	5.88	586.73	3.64	6.53	558.38	3.61	7.13	506.31
5	2.56	4.48	572.83	2.92	5.24	557.15	3.45	5.90	584.75	3.54	6.45	549.12	3.61	7.09	509.10
6	2.66	4.49	593.45	2.92	5.26	555.03	3.35	5.89	568.37	3.64	6.47	563.48	3.61	7.10	508.17
7	2.66	4.52	589.90	2.92	5.26	555.03	3.45	5.89	585.34	3.44	6.53	527.74	3.61	7.10	508.17
8	2.56	4.52	567.01	3.02	5.27	573.38	3.35	5.87	570.99	3.54	6.47	548.01	3.51	7.05	497.31
9	2.66	4.56	584.85	3.02	5.27	572.62	3.35	5.85	572.94	3.44	6.43	535.28	3.51	7.02	499.64
10	2.46	4.55	541.66	2.92	5.26	555.03	3.35	5.91	566.55	3.54	6.49	546.32	3.51	6.98	502.51

Valores obtidos para d = 6 mm e P = 45 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	2.75	3.89	706.43	3.05	4.71	647.97	3.54	5.35	662.06	3.64	6.14	591.80	3.75	6.24	601.67
2	2.65	4.20	630.63	2.95	5.06	583.47	3.34	5.73	583.70	3.34	6.53	510.64	3.75	6.69	560.75
3	2.75	4.60	598.04	3.15	5.58	564.82	3.54	6.18	573.74	3.44	7.24	474.72	3.85	7.30	527.82
4	2.65	4.46	593.32	2.85	5.48	520.26	3.34	5.99	558.64	3.34	6.96	479.65	3.55	7.13	497.97
5	2.55	4.48	568.37	2.85	5.37	530.43	3.44	5.93	580.48	3.34	6.94	481.04	3.65	7.21	506.87
6	2.55	4.48	568.37	2.95	5.41	545.69	3.24	5.93	546.77	3.34	6.89	484.25	3.45	7.28	474.31
7	2.55	4.51	565.09	2.95	5.31	555.87	3.34	6.05	552.54	3.44	6.82	504.03	3.55	7.22	492.03
8	2.65	4.53	584.68	2.95	5.38	548.43	3.24	5.99	541.93	3.34	6.78	491.75	3.55	7.21	492.99
9	2.55	4.52	564.22	2.95	5.35	551.81	3.54	5.97	593.34	3.34	6.72	496.58	3.55	7.17	495.26
10	2.45	4.52	541.35	3.05	5.39	566.28	3.64	5.94	613.47	3.44	6.70	512.53	3.55	7.13	497.97

Valores obtidos para d = 6 mm e P = 50 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	2.73	4.01	680.14	2.96	4.77	619.32	3.25	5.50	591.85	3.44	6.20	555.43	3.51	6.54	537.00
2	2.63	4.27	615.71	2.76	5.11	539.44	3.05	5.78	528.19	3.44	6.65	517.98	3.41	7.30	467.14
3	2.73	4.71	578.28	2.96	5.68	520.15	3.35	6.47	518.63	3.54	7.05	502.13	3.51	7.65	459.27
4	2.53	4.57	552.86	2.86	5.61	509.09	3.05	6.24	489.27	3.34	6.93	482.32	3.41	7.47	456.82
5	2.63	4.58	573.99	2.66	5.58	476.24	3.25	6.22	523.40	3.24	6.90	469.72	3.41	7.38	462.52
6	2.43	4.59	528.77	2.76	5.60	492.41	3.15	6.15	512.76	3.24	6.89	470.61	3.31	7.36	450.18
7	2.53	4.60	548.89	2.76	5.58	493.55	3.15	6.15	512.76	3.34	6.86	486.96	3.51	7.34	478.21
8	2.33	4.61	504.77	2.66	5.60	473.95	3.15	6.09	518.32	3.24	6.78	477.89	3.41	7.30	467.14
9	2.43	4.63	523.52	2.66	5.60	474.54	3.25	6.07	536.52	3.34	6.74	496.07	3.41	7.29	468.36
10	2.53	4.63	545.10	2.66	5.60	474.54	3.35	5.99	559.75	3.54	6.72	527.24	3.51	7.27	483.41

Valores obtidos para d = 6 mm e P = 55 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	2.76	4.06	679.14	3.01	4.78	630.54	3.26	5.58	583.81	3.63	6.32	574.82	3.64	6.58	553.58
2	2.46	4.32	569.25	2.81	5.12	550.04	3.06	6.02	508.39	3.43	6.81	504.26	3.44	7.43	463.26
3	2.56	4.79	534.48	3.01	5.66	532.89	3.16	6.57	480.75	3.53	7.30	484.24	3.44	7.86	438.02
4	2.46	4.63	530.43	2.81	5.51	511.17	3.06	6.44	475.08	3.33	7.09	470.04	3.54	7.62	464.77
5	2.46	4.62	531.92	2.81	5.46	515.48	3.06	6.43	475.60	3.33	7.01	475.34	3.44	7.54	456.80
6	2.56	4.61	555.12	2.81	5.50	511.82	3.06	6.40	478.50	3.23	6.98	463.66	3.44	7.49	459.61
7	2.56	4.63	552.01	2.91	5.58	521.85	3.06	6.40	478.05	3.33	6.99	477.10	3.44	7.48	460.04
8	2.36	4.65	507.31	2.81	5.54	508.13	3.06	6.40	478.05	3.33	6.93	481.17	3.44	7.42	464.13
9	2.46	4.66	527.35	3.01	5.55	542.97	3.16	6.36	497.25	3.33	6.90	483.47	3.44	7.38	466.59
10	2.56	4.67	547.28	2.91	5.51	529.34	3.06	6.34	483.03	3.43	6.88	498.98	3.54	7.34	482.76

Valores obtidos para d = 8 mm e P = 60 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.49	5.45	640.59	3.62	6.27	577.76	3.90	6.92	564.00	3.49	6.84	510.53	3.59	6.86	523.34
2	3.09	5.70	542.13	3.42	6.74	507.41	3.80	7.21	527.97	3.49	8.08	432.14	3.69	8.56	430.99
3	3.69	6.35	580.97	3.62	7.24	500.41	3.90	7.52	519.49	3.69	8.43	437.62	3.49	8.68	401.75
4	3.49	6.12	569.56	3.52	6.99	503.57	3.70	7.33	505.25	3.39	8.28	409.42	3.59	8.56	419.01
5	3.59	6.94	516.85	3.52	7.13	494.04	3.80	7.27	523.17	3.49	8.28	421.50	3.49	8.79	396.63
6	3.39	6.12	553.78	3.32	6.88	482.71	3.80	7.18	529.88	3.49	8.27	422.16	3.49	8.58	406.67
7	3.39	6.19	547.33	3.42	6.98	490.61	3.90	7.34	531.59	3.49	8.25	423.18	3.59	8.98	399.60
8	3.29	6.18	532.30	3.42	6.87	498.18	3.80	7.07	538.28	3.29	8.24	399.27	3.39	8.70	389.34
9	3.29	6.20	530.58	3.32	6.73	493.54	3.80	7.25	524.54	3.49	8.35	417.86	3.39	8.68	390.23
10	3.29	6.22	528.36	3.42	6.78	504.94	3.70	7.24	511.74	3.39	8.26	410.41	3.49	8.66	402.68

Valores obtidos para d = 8 mm e P = 65 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.08	5.99	513.68	3.36	6.52	514.72	3.49	6.82	511.21	3.58	6.98	513.39	3.58	6.84	522.87
2	2.98	6.30	473.00	3.26	6.86	474.91	3.49	7.67	454.58	3.48	8.06	432.15	3.68	8.25	445.60
3	3.18	6.91	459.98	3.46	7.52	459.88	3.39	8.16	415.45	3.68	8.54	431.53	3.48	8.57	405.83
4	2.98	6.77	439.88	3.36	7.30	459.47	3.39	8.00	423.66	3.48	8.37	416.15	3.68	8.72	422.03
5	2.98	6.74	441.58	3.16	7.28	433.64	3.29	8.00	411.15	3.48	8.42	413.88	3.58	8.57	417.50
6	2.88	6.74	427.19	3.26	7.27	447.81	3.39	7.92	427.56	3.28	8.42	390.12	3.68	8.70	423.00
7	2.78	6.74	411.92	3.26	7.25	448.98	3.19	7.91	402.98	3.38	8.40	402.91	3.48	8.74	397.89
8	2.78	6.74	411.92	3.16	7.25	435.19	3.39	7.88	429.73	3.28	8.37	392.26	3.38	8.69	388.77
9	2.98	6.74	441.58	3.26	7.26	448.61	3.29	7.87	417.74	3.28	8.33	394.43	3.58	8.73	409.95
10	2.88	6.76	425.49	3.16	7.25	435.19	3.29	7.86	418.43	3.48	8.43	413.19	3.58	8.68	412.12

Valores obtidos para d = 8 mm e P = 70 bar

Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.31	5.95	555.35	3.49	6.51	536.35	3.42	7.00	488.79	3.50	6.95	504.32	3.42	7.23	472.35
2	3.11	6.20	501.21	3.39	6.88	493.02	3.32	7.65	434.42	3.50	8.08	433.88	3.52	8.92	394.13
3	3.21	6.82	469.88	3.39	7.43	456.26	3.32	8.27	401.84	3.70	8.42	440.01	3.42	8.88	384.68
4	3.01	6.64	452.78	3.29	7.22	455.74	3.12	8.10	385.67	3.50	8.29	422.53	3.62	8.81	410.26
5	2.91	6.59	441.24	3.29	7.23	455.36	3.12	7.99	390.74	3.60	8.66	415.97	3.52	8.87	396.26
6	3.01	6.60	455.52	3.29	7.19	457.83	3.12	7.91	394.64	3.50	8.31	421.86	3.42	8.81	387.57
7	2.91	6.61	439.50	3.19	7.20	443.12	3.22	8.13	396.41	3.50	8.30	422.17	3.42	8.83	386.69
8	3.01	6.61	454.63	3.29	7.17	459.11	3.32	7.87	422.38	3.40	8.32	409.13	3.42	8.82	387.26
9	3.11	6.61	470.18	3.29	7.16	459.56	3.32	8.02	414.42	3.60	8.30	434.22	3.42	8.72	391.65
10	3.11	6.59	471.61	3.39	7.15	474.39	3.22	8.01	402.25	3.30	8.31	397.78	3.52	9.09	386.76

Valores obtidos para d = 8 mm e P = 75 bar

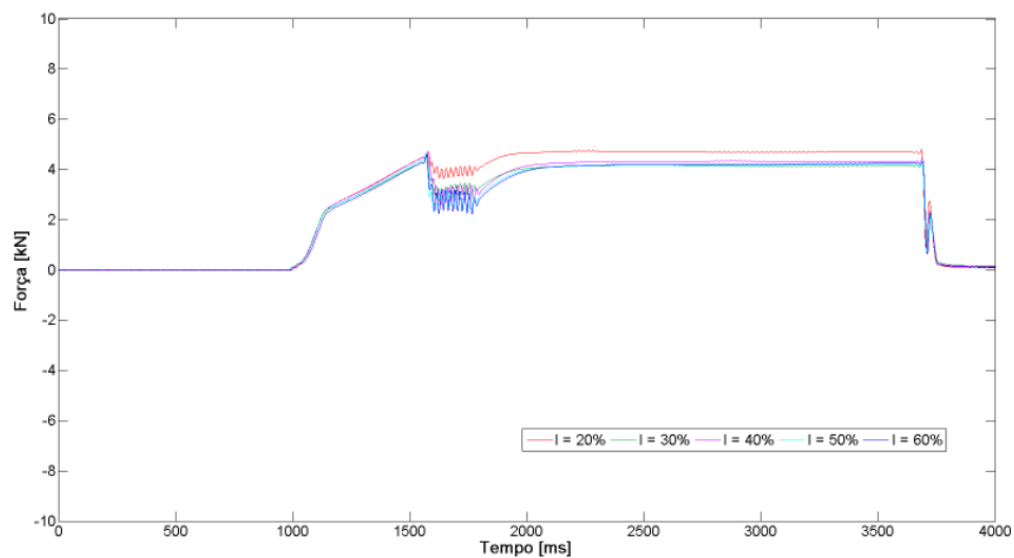
Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.13	6.05	517.51	3.43	6.64	516.95	3.40	7.11	478.28	3.49	7.50	465.11	3.31	7.05	470.27
2	3.03	6.21	488.24	3.13	6.80	460.39	3.30	7.61	433.67	3.39	8.38	404.11	3.51	8.55	410.99
3	3.03	6.92	438.47	3.43	8.08	424.96	3.40	8.23	413.52	3.49	8.77	397.31	3.51	8.79	399.59
4	3.03	6.69	453.55	3.13	7.41	422.67	3.10	8.01	387.27	3.19	8.65	368.37	3.41	8.73	391.15
5	3.13	6.70	467.60	3.13	7.48	418.60	3.30	7.95	415.35	3.39	8.61	393.26	3.41	8.75	390.26
6	2.83	6.70	422.43	3.03	7.46	406.65	3.20	7.84	408.52	3.29	8.59	382.54	3.41	8.72	391.74
7	2.83	6.83	414.64	3.03	7.42	408.85	3.10	7.51	413.10	3.29	8.59	382.54	3.41	8.74	390.84
8	2.93	6.56	447.02	3.03	7.38	410.67	3.40	7.91	430.03	3.19	8.53	373.51	3.41	8.72	391.42
9	3.03	6.58	460.86	3.13	7.38	424.56	3.20	7.50	427.22	3.39	8.46	400.33	3.51	8.73	402.61
10	2.83	6.63	427.47	3.23	7.32	441.29	3.20	7.59	421.65	3.39	8.56	395.70	3.41	8.72	391.74

Valores obtidos para d = 8 mm e P = 80 bar

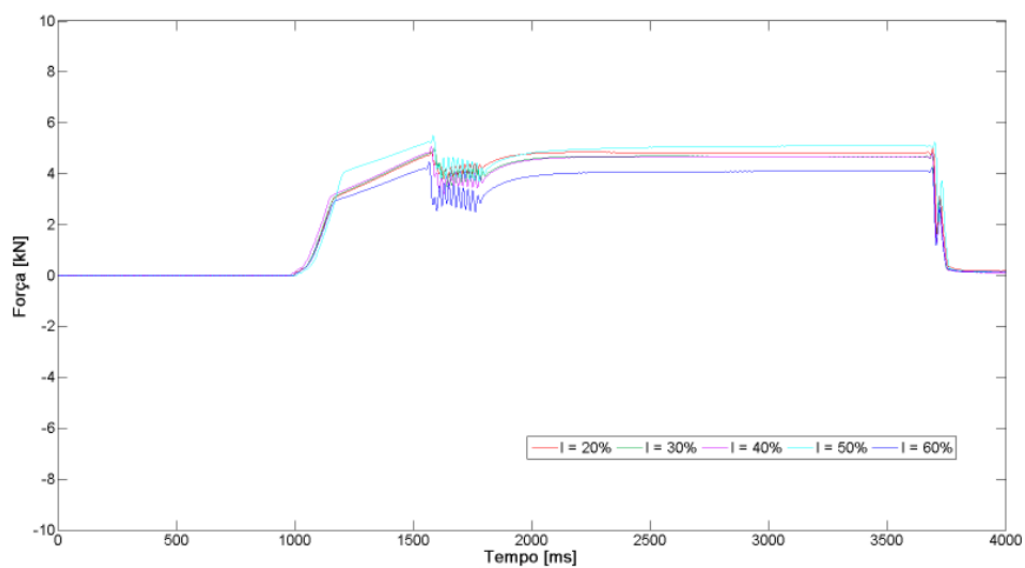
Ciclo	V _{20%} [V]	I _{20%} [kA]	Rd _{20%} [mΩ]	V _{30%} [V]	I _{30%} [kA]	Rd _{30%} [mΩ]	V _{40%} [V]	I _{40%} [kA]	Rd _{40%} [mΩ]	V _{50%} [V]	I _{50%} [kA]	Rd _{50%} [mΩ]	V _{60%} [V]	I _{60%} [kA]	Rd _{60%} [mΩ]
1	3.01	6.09	494.66	3.18	6.70	474.94	3.50	6.95	503.45	3.28	7.13	459.27	3.21	7.11	452.23
2	2.91	6.28	463.15	3.08	7.03	438.88	3.20	7.73	413.55	3.28	8.27	395.99	3.41	8.66	394.14
3	3.01	6.94	433.59	3.18	7.77	409.68	3.50	8.41	416.18	3.18	8.81	360.62	3.31	9.01	367.73
4	2.91	6.74	431.49	2.98	7.55	395.34	3.10	8.17	379.29	3.18	8.70	364.97	3.31	8.92	371.57
5	2.81	6.72	417.91	2.98	7.54	396.02	3.10	8.16	379.61	3.18	8.57	370.60	3.21	8.91	360.88
6	3.01	6.72	447.65	2.98	7.54	396.02	3.20	8.17	391.53	3.28	8.77	373.38	3.21	8.78	366.02
7	2.81	6.72	417.91	2.98	7.53	396.39	3.30	8.11	406.71	3.08	8.56	359.22	3.41	9.04	377.74
8	3.01	6.49	463.58	3.08	7.35	419.59	3.20	8.12	393.75	3.38	9.04	373.53	3.41	8.83	386.46
9	2.91	6.57	443.19	2.88	7.33	393.40	3.10	8.11	382.04	3.28	8.76	373.93	3.51	8.79	399.86
10	3.01	6.60	456.13	2.98	7.52	397.07	3.10	8.10	382.37	3.28	8.76	373.93	3.51	9.12	385.14

Anexo A2. Gráficos da força de aperto

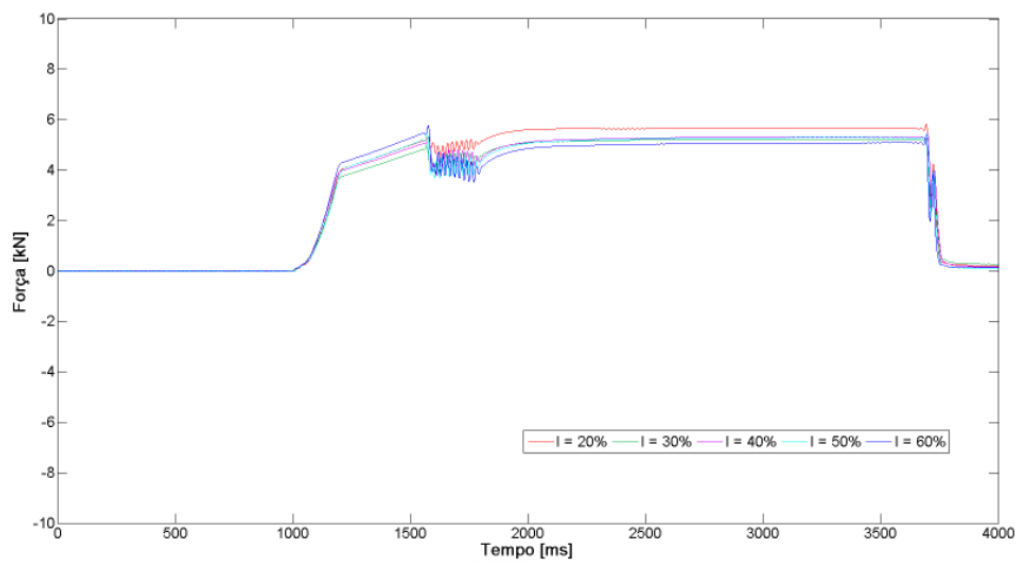
Varões de 6 mm de diâmetro



Ensaio 6_40

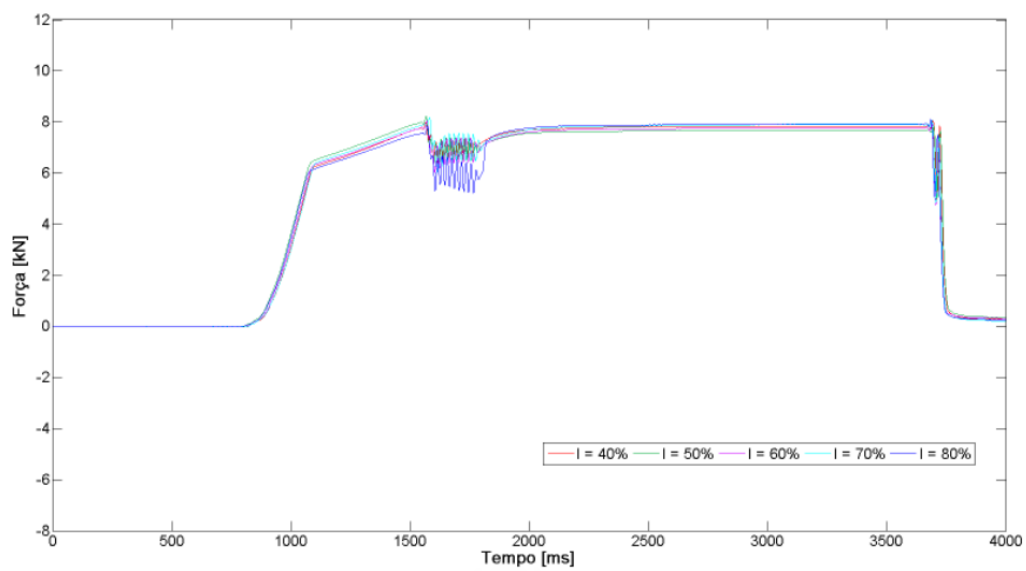


Ensaio 6_45

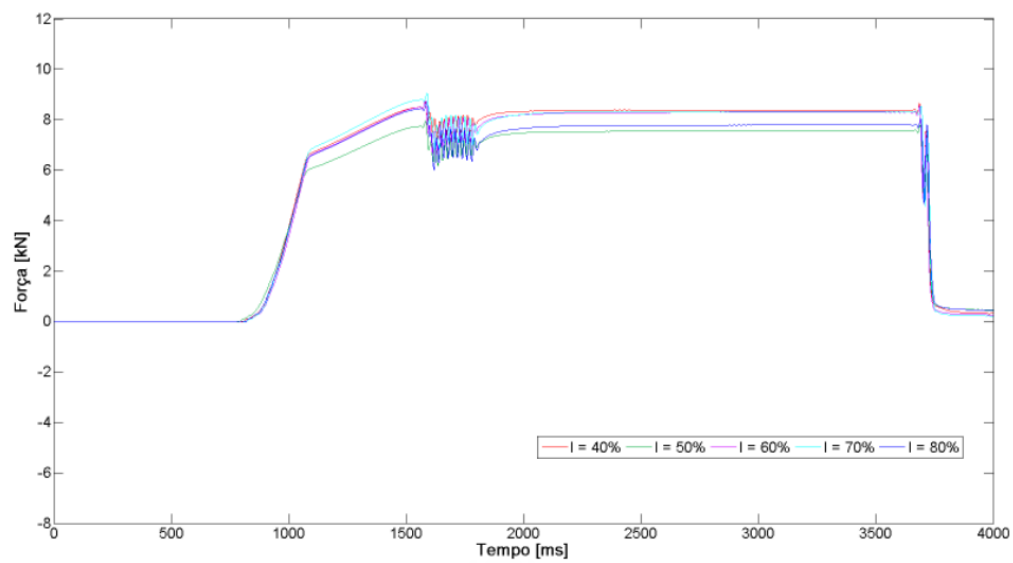


Ensaio 6_50

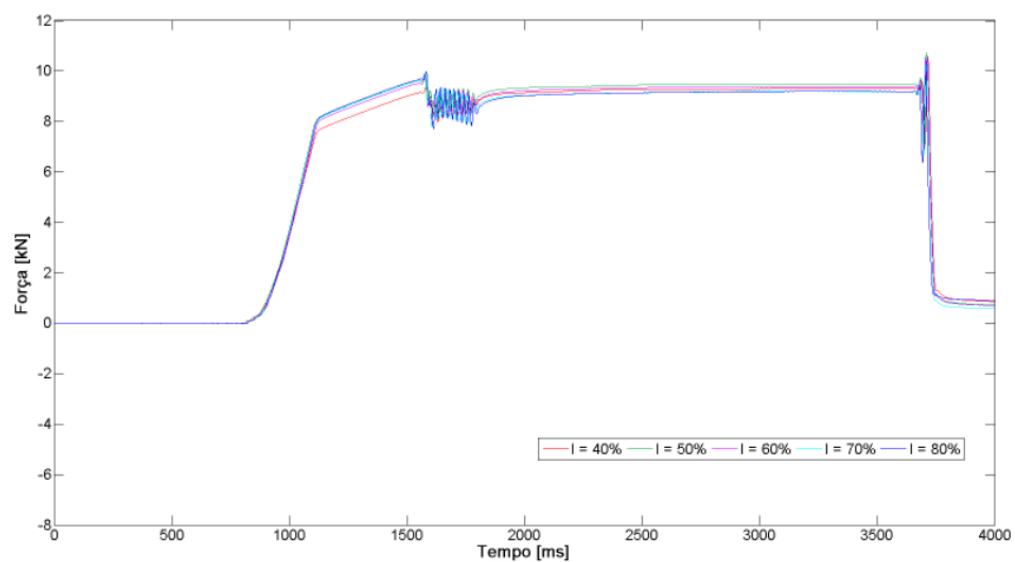
Varões de 8 mm de diâmetro



Ensaio 8_65



Ensaio 8_70



Ensaio 8_75